

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ПРОЕКТ

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ
по дисциплине
«Системы автоматического управления»

Разработано:
к.тн, доцент каф. АСУТП МЭИ
А.А. Калашников

Москва - 2020

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКИХ СРЕД В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЕМКОСТЯХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Организация измерений уровня посредством датчиков разности давлений (гидростатическим способом) для технологических емкостей, находящихся под давлением или разрежением, выполняется с применением однокамерных и двухкамерных уравнительных сосудов [1]. Типовая схема измерения уровня с применением однокамерного уравнительного сосуда (УСО) приведена на рисунке 8.

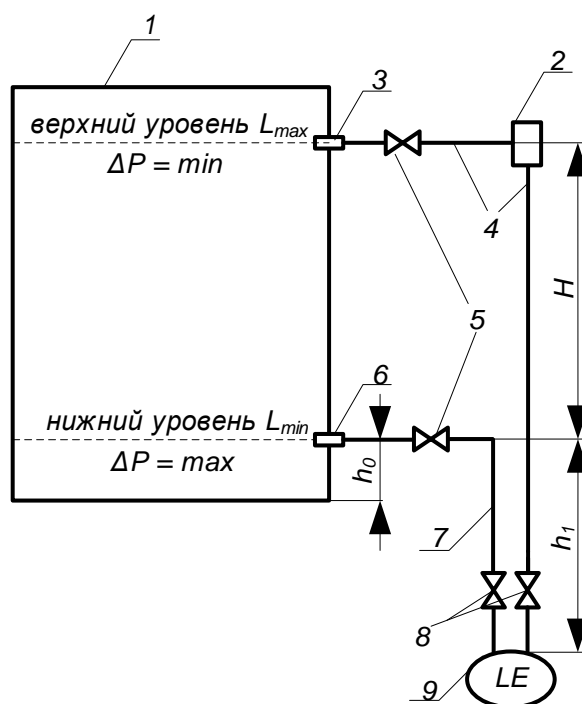


Рисунок 8 – Измерение уровня в технологической емкости под давлением с применением однокамерного уравнительного сосуда

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 уравнимера; h_0 – расстояние от внутренней образующей дна емкости до нижнего штуцера; L_{max} – максимальное измеряемое значение уровня; L_{min} – значение уровня, соответствующее высоте нижнего штуцера.

При данной схеме измерений уравнительному сосуду сообщается давление или разрежение со стороны технологической емкости, и на датчике разности давлений (ДД) в общем случае возникает перепад [1, 7]:

$$\begin{aligned} \Delta P = P_{\Sigma''+''} - P_{\Sigma''-''} &= P_{вн} + \rho_{ил1} \cdot g \cdot (h_1 + H) - P_{вн} - (\rho_{ил2} \cdot g \cdot h_1 + \rho_{ср} \cdot g \cdot L) = \\ &= \rho_{ил1} \cdot g \cdot H + (\rho_{ил1} - \rho_{ил2}) g h_1 - \rho_{ср} \cdot g \cdot L, \end{aligned} \quad (15)$$

где ΔP – измеряемый перепад давлений;

$P_{\Sigma^{+}}$ – общее давление, оказываемое со стороны плюсовой линии;

$P_{\Sigma^{-}}$ – общее давление, оказываемое со стороны минусовой линии;

$P_{\text{вн}}$ – давление/разрежение внутри технологической емкости;

$\rho_{\text{ил1}}$ – плотность среды в плюсовой импульсной линии и УСО;

$\rho_{\text{ил2}}$ – плотность среды в минусовой импульсной линии и УСО;

g – местное ускорение свободного падения на площадке производственного объекта;

h_1 – высота импульсных линий до нижней врезки;

H – база датчика уровня;

L – уровень среды в технологической емкости;

$\rho_{\text{ср}}$ – плотность рабочей среды в технологической емкости.

В случае двухфазной рабочей среды «вода-пар» в технологической емкости уравнение (15) преобразуется к виду [9]:

$$\Delta P = \rho_{\text{ил1}} \cdot g \cdot H + (\rho_{\text{ил1}} - \rho_{\text{ил2}}) g h_1 - \rho' \cdot g \cdot L - \rho'' \cdot g \cdot (H - L),$$

где ρ' – плотность воды в технологической емкости;

ρ'' – плотность пара в технологической емкости.

При текущем значении уровня воды в технологической емкости $L > H + h_0$ (рис. 8) гидростатическое давление $\rho' \cdot g \cdot (L - H - h_0)$ воздействует как на плюсовую, так и минусовую импульсную линию, в связи с чем компенсируется, и область измерений датчика ограничивается величиной фактической базы уровнемера H . В результате, измеряя разность давлений ΔP , на основе вышеуказанных зависимостей определяется текущее значение уровня L строго в пределах базы уровнемера H .

Основные преимущества данной схемы измерения:

- 1) рабочая среда в плюсовой импульсной линии и в технологической емкости находится под одним давлением;
- 2) независимо от изменения плотности рабочей среды верхняя точка измерений уровня фиксирована и определяется местоположением уравнительного сосуда.

Причины появления возможных дополнительных погрешностей:

- 1) несоответствие изначально заданных шкал измерений по отношению к фактической базе уровнемера эвентуально для тех случаев, когда на этапе проектирования не представляется возможным спрогнозировать точное место размещения УСО до выполнения монтажных работ;
- 2) изменение плотности рабочей среды в технологической емкости по отношению к значениям, которые учитывают настроенные параметры измерительного канала;

- 3) разные температурные условия среды в технологической емкости и в импульсных линиях;
- 4) наличие разных фаз среды (например, воды и водяного пара) в технологической емкости.

Применяемые корректировки показаний с целью исключения вышеуказанных дополнительных систематических составляющих погрешностей:

- 1) коррекция на фактическую базу гидростатического уровнемера (по «холодной» шкале);
- 2) температурная коррекция на плотность рабочей среды в технологической емкости (на «горячую» шкалу).

В тех случаях, когда температура рабочей среды в технологической емкости равна температуре окружающего воздуха, соответствующая шкала измерений ИК, обеспечивающая достоверность показаний, условно называется «холодной». Когда температура рабочей среды выше температуры окружающего воздуха, соответствующая шкала измерений условно называется «горячей».

С целью обеспечения одинаковых температурных условий рабочей среды в плюсовой импульсной линии и в технологической емкости в промышленности применяются двухкамерные уравнильные сосуды (УСД).

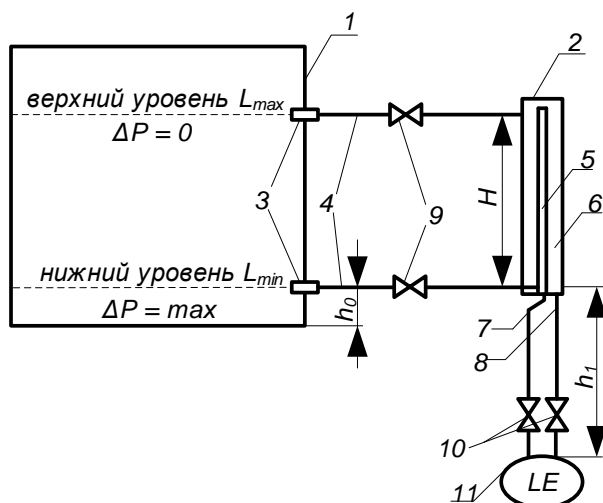


Рисунок 9 – Измерение уровня с применением двухкамерного уравнильного сосуда
 1 – технологическая емкость под давлением; 2 – двухкамерный уравнильный сосуд (УСД); 3 – штуцер; 4 – трубные проводки; 5 – камера с переменным уровнем среды (минусовая); 6 – камера, в которой уровень среды поддерживается постоянным (плюсовая); 7 – минусовая импульсная линия; 8 – плюсовая импульсная линия; 9 – коренные ventили; 10 – отсечные ventили; 11 – датчик разности давлений (ДД).

При наличии теплоизоляции за счет циркуляции рабочей среды в минусовой камере УСД поддерживаются одинаковые температурные условия в камерах сосуда и в технологической

емкости [7]. Ввиду данных особенностей перепад давлений на датчике в общем случае описывается выражением:

$$\Delta P = P_{\Sigma''''} - P_{\Sigma'''} = P_{\text{вн}} + \rho_{\text{ил}} \cdot g \cdot h_1 + \rho_{\text{усд}} \cdot g \cdot H - P_{\text{вн}} - (\rho_{\text{ил}} \cdot g \cdot h_1 + \rho_{\text{ср}} \cdot g \cdot L) = \\ = \rho_{\text{усд}} \cdot g \cdot H - \rho_{\text{ср}} \cdot g \cdot L,$$

где $\rho_{\text{ил}}$ – плотность среды в импульсных линиях;

$\rho_{\text{усд}}$ – плотность среды в плюсовой камере (с постоянным уровнем среды) в УСД.

В случае двухфазной рабочей среды «пар – вода» в технологической емкости данное уравнение преобразуется к виду [9]:

$$\Delta P = \rho' \cdot g \cdot H - \rho' \cdot g \cdot L - \rho'' \cdot g \cdot (H - L).$$

Измеряя перепад давлений, на основе данного соотношения косвенно определяется значение уровня воды в технологической емкости.

Основные преимущества данной схемы измерения:

- 1) рабочая среда в УСД и технологической емкости находится в одинаковых условиях как по давлению, так и по температуре;
- 2) фактическая база уровнемера определяется размером двухкамерного уравнительного сосуда, что позволяет абсолютно точно задавать шкалу измерительного канала на этапе проектирования;
- 3) импульсные линии (ИЛ), отходящие к датчику, трассируются в непосредственной близости друг к другу, что обеспечивает одинаковые температурные условия, и, следовательно, одинаковую плотность среды в обеих линиях. В связи с этим гидростатические давления в ИЛ уравнивают друг друга и не влияют на показания датчика разности давлений (ДД).

Причина появления возможных неточностей показаний:

- 1) изменение плотности двухфазной рабочей среды в технологической емкости по отношению к значениям, которые учтены в настройках измерительного канала;

С целью исключения систематической погрешности измерений уровня, вызванной вышеуказанной причиной, по необходимости вводится температурная коррекция показаний на плотность рабочей среды (на «горячую» шкалу).

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ В ОТКРЫТЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЕМКОСТЯХ

Для организации измерений уровня в открытых технологических емкостях, сообщающихся с атмосферой (находящихся под атмосферным давлением), применяются гидростатические схемы измерения с использованием датчиков избыточного давления (ДИ) и разности давлений (ДД).

Типовая схема измерения уровня с использованием датчика избыточного давления представлена на рисунке 3.

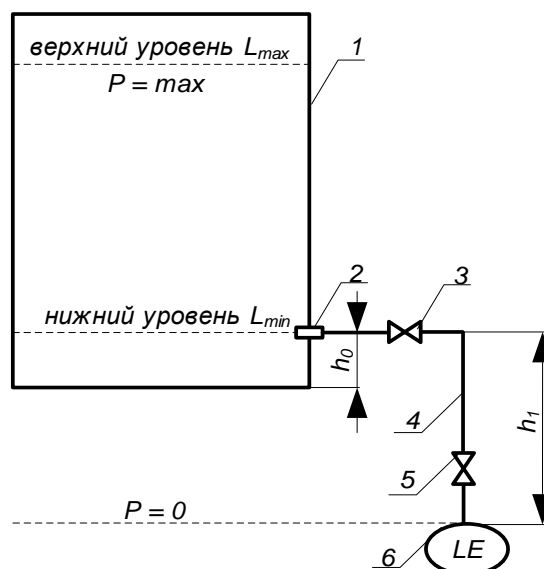


Рисунок 10 – Измерение уровня в открытой технологической емкости с применением датчика избыточного давления

1 – открытая технологическая емкость, сообщающаяся с атмосферой; 2 – штуцер (место врезки импульсной линии); 3 – коренной вентиль; 4 – импульсная линия (трубная проводка); 5 – отсечной вентиль; 6 – датчик избыточного давления (ДИ); P – измеряемое давление; h_1 – высота импульсной линии; h_0 – расстояние от внутренней образующей дна емкости до штуцера; L_{max} – максимальное измеряемое значение уровня; L_{min} – значение уровня, соответствующее высоте нижнего штуцера.

При данной схеме измерений уровня избыточное давление на датчике определяется суммой давлений:

$$P = \rho \cdot g \cdot L + \rho \cdot g \cdot h_1 = \rho \cdot g \cdot (L + h_1)$$

где ρ – плотность среды в технологической емкости и в импульсной линии.

Достоинством данной схемы является простота ее реализации.

Основные недостатки:

- 1) Изменение плотности рабочей среды приводит к «плавающему» верхнему пределу измерений уровня;
- 2) При настройке измерительного канала необходимо учитывать поправку на гидростатическое давление столба жидкости в ИЛ;
- 3) Высота импульсной линии (ИЛ) должна быть соизмерима с диапазоном измеряемого уровня по аналогии со схемой на рисунке 1 (п. 1.1).

Причины появления возможных неточностей показаний:

- 1) отличие рабочего значения плотности среды от значения, в соответствии с которым выполнена настройка измерительного канала
- 2) настройка измерительного канала без учета гидростатического давления столба жидкости в импульсной линии.

Применяемые корректировки показаний:

- 1) коррекция на номинальное значение плотности среды (по необходимости);
- 2) коррекция показаний на гидростатическое давление столба жидкости в ИЛ.

Влияние гидростатического давления столба жидкости ИЛ линии на результаты измерений исключается при размещении датчика на уровне врезки ИЛ (в этом случае $h_1 = 0$) или за счет применения открытого уравнительного сосуда (сообщающегося с атмосферой) и датчика разности давлений (рис. 11).

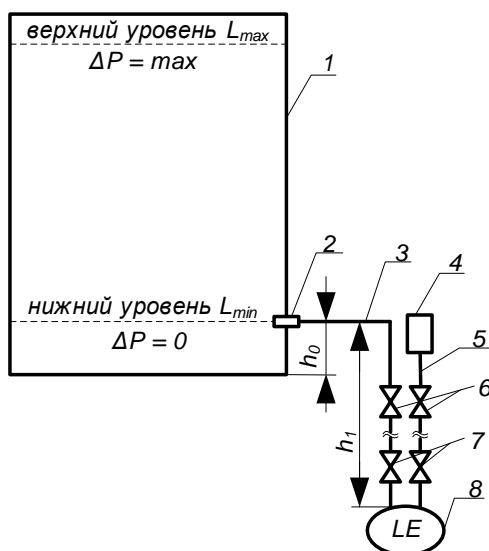


Рисунок 11 – Измерение уровня среды в открытой технологической емкости при расположении УСО на уровне врезки импульсной линии

1 – открытая технологическая емкость; 2 – штуцер (место врезки плюсовой импульсной линии); 3 – плюсовая импульсная линия; 4 – открытый однокамерный уравнительный сосуд; 5 – минусовая импульсная линия; 6 – коренные ventили; 7 – отсечные ventили; 8 – датчик разности давлений (ДД).

При данной схеме измерений среда в однокамерном уравнительном сосуде, также как и среда в технологической емкости, сообщается с атмосферой (находится под атмосферным давлением) и имеет температуру окружающего воздуха.

При данном способе измерения на датчике разности давлений (ДД) возникает перепад давлений:

$$\Delta P = P_{\Sigma'''+''} - P_{\Sigma''+''} = P_{\text{атм}} + (\rho \cdot g \cdot h_1 + \rho \cdot g \cdot L) - P_{\text{атм}} - \rho \cdot g \cdot h_1 = \rho \cdot g \cdot L, \quad (16)$$

где $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление.

Из соотношения (16) видно, что гидростатические давления столбов жидкости в минусовой и плюсовой ИЛ уравнивают друг друга, и область измерений уровня определяется только самой шкалой измерений датчика ДД.

В отличие от предыдущей схемы основной недостаток остается лишь в том, что изменение плотности рабочей среды приводит к «плавающему» верхнему значению измеряемого уровня.

Причина появления возможных неточностей показаний:

1) отличие рабочего значения плотности среды по отношению настройкам измерительного канала

Применяемая коррекция показаний:

1) коррекция на рабочее значение плотности среды (по необходимости).

В тех случаях, когда необходимо зафиксировать верхний измеряемый предел уровня, уравнительный сосуд поднимается на соответствующую высоту - базу уровнемера H (рис. 12).

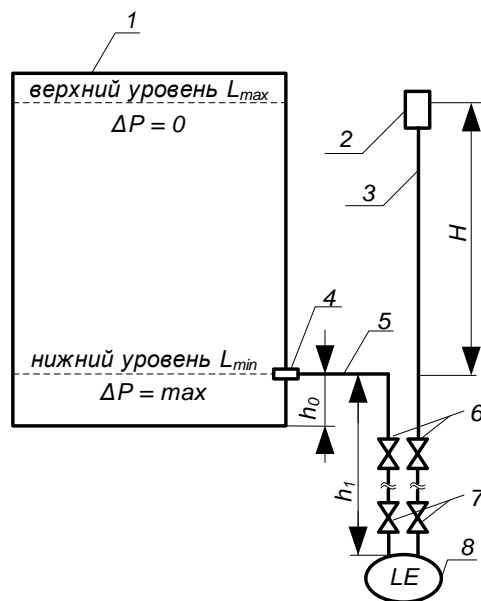


Рисунок 12 – Измерение уровня среды в открытой технологической емкости при расположении УСО на высоте максимального контролируемого уровня

1 – открытая технологическая емкость; 2 – однокамерный уравнительный сосуд; 3 – плюсовая импульсная линия; 4 – штуцер (место врезки минусовой импульсной линии); 5 – минусовая импульсная линия; 6 – коренные вентили; 7 – отсечные вентили; 8 – датчик разности давлений (ДД).

При данной схеме измерений на датчике разности давлений в общем случае возникает перепад:

$$\Delta P = P_{\Sigma''+''} - P_{\Sigma''-''} = P_{\text{атм}} + \rho \cdot g \cdot (h_1 + H) - (P_{\text{атм}} + \rho \cdot g \cdot h_1 + \rho \cdot g \cdot L) = \\ = \rho \cdot g \cdot (H - L),$$

Из рисунка 12 видно, что нулевой перепад давлений на датчике будет только при максимальном измеряемом значении уровня. Вследствие этого независимо от изменений плотности рабочей среды в технологической емкости диапазон измерений уровня остается постоянным и определяется величиной фактической базы H .

Преимущество данной схемы измерения:

1) независимо от изменения плотности рабочей среды верхняя точка измерений уровня фиксирована и определяется местоположением уравнильного сосуда.

Причины появления возможных неточностей показаний:

1) несоответствие шкалы измерений фактической базе уровнемера;
2) изменение рабочего значения плотности по отношению к настроечным параметрам измерительного канала.

Применяемая коррекция показаний:

1) коррекция на фактическую плотность рабочей среды (по необходимости);
2) коррекция на величину фактической базы H (по необходимости).

Явыуякпыку

.4 Коррекция показаний ИК на фактическую базу уровнемера

Для гидростатических схем с расположением УСО на высоте максимального измеряемого уровня (рис. 8, 12) коррекция показаний на высоту фактической базы осуществляется за счет точной настройки шкалы измерений, задаваемой на датчике разности давлений (ДД) и в программно-техническом комплексе (ПТК), входящим в структуру измерительного канала.

Порядок выполнения расчетов шкалы измерений ИК

1) Определение максимального возможного перепада давлений на датчике:

$$\Delta P_{\text{max}} = \rho'_{\text{хи}} \cdot g \cdot H \quad (18)$$

где $\rho'_{\text{хи}}$ – плотность воды в технологической емкости и импульсной линии по «холодной» шкале,

g – местное ускорение свободного падения на площадке производственного объекта;

H – фактическое значение базы ИК уровня, найденное по результатам геодезических измерений.

2) Выбор ближайшего значения верхнего предела шкалы измерений датчика ДД из стандартного ряда согласно ГОСТ 22520 [6]:

$$\Delta P_{\text{шк. max}} \geq \Delta P_{\text{max}}$$

3) Определение нижнего и верхнего пределов шкалы измерений, задаваемых в ПТК:

$$L_{\text{шк. max}} = H + h_0,$$

$$L_{\text{шк. min}} = H + h_0 - (\Delta P_{\text{шк. max}} / \rho'_{\text{хш}} \cdot g).$$

Приведенная формула для расчета $L_{\text{шк. min}}$ удовлетворяет случаю, когда за показания ИК уровня «0 мм» принимают дно технологической емкости. Когда за показания уровня «0 мм» принимают высоту нижней врезки импульсной линии, то $h_0 = 0$.

4) Определение нижнего и верхнего пределов шкалы измерений, задаваемых в системе верхнего уровня (СВУ) из состава АСУ ТП:

$$L_{\text{сву min}} = h_0$$

$$L_{\text{сву max}} = L_{\text{сву min}} + H.$$

Определение данных значений выполняется в случае трехуровневой структуры АСУ ТП с цифровым обменом данными между системой верхнего уровня и ПТК среднего уровня АСУ ТП. Это позволяет обеспечить удобство отображения информации для обслуживающего технологического персонала, включая операторов управления технологическим процессом. В случае двухуровневой структуры АСУ ТП определение шкал по пункту 4 не требуется.

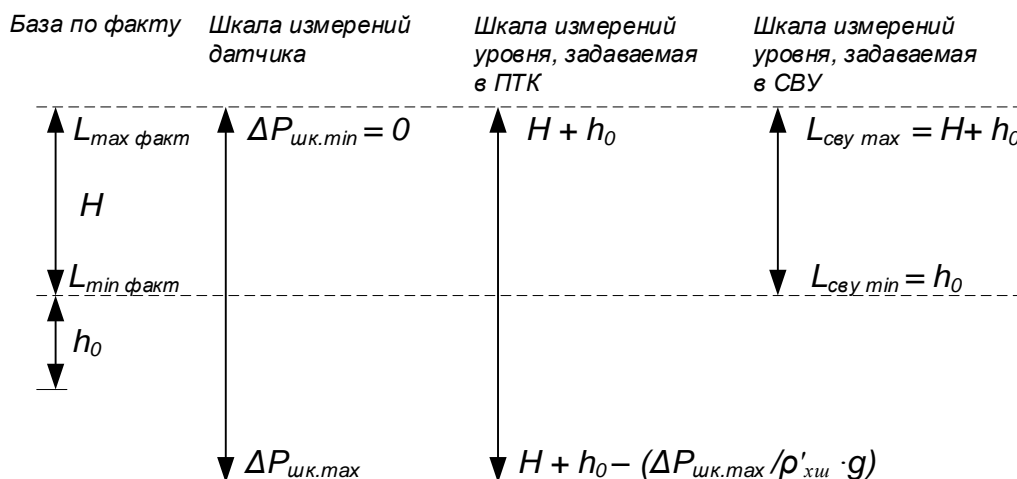


Рисунок 14 – Задаваемое соотношение шкал измерений для корректировки показаний на фактическую базу ИК уровня

В дополнение к вышеуказанному необходимо отметить, что настройка шкал измерений в строгом соответствии со значениями из стандартного ряда, регламентированным ГОСТ 22520, повышает безопасность эксплуатации промышленных объектов. В частности, это обеспечивает унификацию настроек ИК с датчиками давления/разности давлений и, главное, позволяет предупредить ошибки, связанные с человеческим фактором. Так, ввиду дискретности значений стандартного ряда неверная установка шкалы измерений датчика приведет к мгновенному увеличению или занижению показаний канала как минимум в 1,5 раза, что сразу позволит выявить ее и устранить.

2.5 Элементы метрологического анализа: расчет систематической составляющей погрешности, вызванной изменением теплофизических характеристик рабочей среды

Появление систематической погрешности в связи с изменением теплофизических характеристик рабочей среды наиболее характерно для измерений уровня в закрытых технологических емкостях под давлением (рис. 8, 9). Так, на объектах энергетики в связи с изменениями температур и давлений в емкостях данного типа плотность рабочей среды может снижаться с 998 кг/м³ до 590 кг/м³, а плотность пара при этом может достигать свыше 130 кг/м³ (плотность воды и пара при температуре 346 °C).

При неточности или отсутствии введенной температурной коррекции оценка систематической составляющей погрешности измерительного канала в общем случае с применением УСО осуществляется по формуле [1]:

$$L_{гш} - L_{ик} = H \cdot \left(\frac{\rho_{гш}^{ул} - \rho_{гш}''}{\rho_{гш}' - \rho_{гш}''} - \frac{\rho_{ик}^{ул} - \rho_{ик}''}{\rho_{ик}' - \rho_{ик}''} \right) - \frac{\Delta P}{g} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{гш}' - \rho_{гш}''} - \frac{1}{\rho_{ик}' - \rho_{ик}''} \right)$$

или

$$L_{гш} - L_{ик} = H \cdot \left(\frac{\rho_{гш}^{ул} - \rho_{гш}'' - \rho_{ик}^{ул} + \rho_{ик}''}{\rho_{гш}' - \rho_{гш}''} \right) + L_{ик} \cdot \left(\frac{\rho_{ик}' - \rho_{ик}''}{\rho_{гш}' - \rho_{гш}''} - 1 \right), \quad (19)$$

где измеряемый перепад давлений на датчике $\Delta P \in [\rho_{гш}^{ул} \cdot g \cdot H - \rho_{гш}' \cdot g \cdot H; \rho_{гш}^{ул} \cdot g \cdot H - \rho_{гш}'' \cdot g \cdot H]$,

$L_{гш}$ – фактический уровень среды (по «горячей» шкале),

$L_{ик}$ – показания измерительного канала,

$\rho_{гш}^{ул}$ – плотность воды в плюсовой импульсной линии для «горячей» шкалы,

$\rho_{гш}'$ – плотность воды в технологической емкости для «горячей» шкалы,

$\rho_{гш}''$ – плотность воды в технологической емкости для «горячей» шкалы,

$\rho_{ик}^{ул}$ – плотность воды в плюсовой импульсной линии, учтенная настройками ИК,

$\rho_{ик}'$ – плотность воды в технологической емкости, учтенная настройками ИК,

$\rho_{ик}''$ – плотность пара в технологической емкости, учтенная настройками ИК.

В частности, если температурная коррекция не вводилась, и ИК настроен по «холодной» шкале ($\rho_{ик}' = \rho_{ик}^{ул} = \rho_{хш}'$ и $\rho_{ик}'' = \rho_{хш}''$), формула (19) имеет вид:

$$L_{гш} - L_{хш} = H \cdot \left(\frac{\rho_{гш}^{ул} - \rho_{гш}'' - \rho_{хш}' + \rho_{хш}''}{\rho_{гш}' - \rho_{гш}''} \right) + L_{хш} \cdot \left(\frac{\rho_{хш}' - \rho_{хш}''}{\rho_{гш}' - \rho_{гш}''} - 1 \right) \quad (20)$$

Для оценки систематической составляющей погрешности при измерении уровня с использованием УСД ($\rho_{гш}' = \rho_{гш}^{ул}$) формула (19) упрощается к виду:

$$L_{гш} - L_{хш} = H \cdot \left(1 - \frac{\rho_{ик}^{ул} - \rho_{ик}''}{\rho_{гш}' - \rho_{гш}''} \right) + L_{хш} \cdot \left(\frac{\rho_{ик}' - \rho_{ик}''}{\rho_{гш}' - \rho_{гш}''} - 1 \right) \quad (21)$$

Входящие в уравнения (18) – (21) неизмеряемые значения плотности $\rho_{гш}^{ул}$, $\rho_{гш}'$, $\rho_{гш}''$, $\rho_{хш}'$ определяются по уравнениям международной формуляции IAPWS-IF [3, 4] при соответствующих значениях температуры и давления.

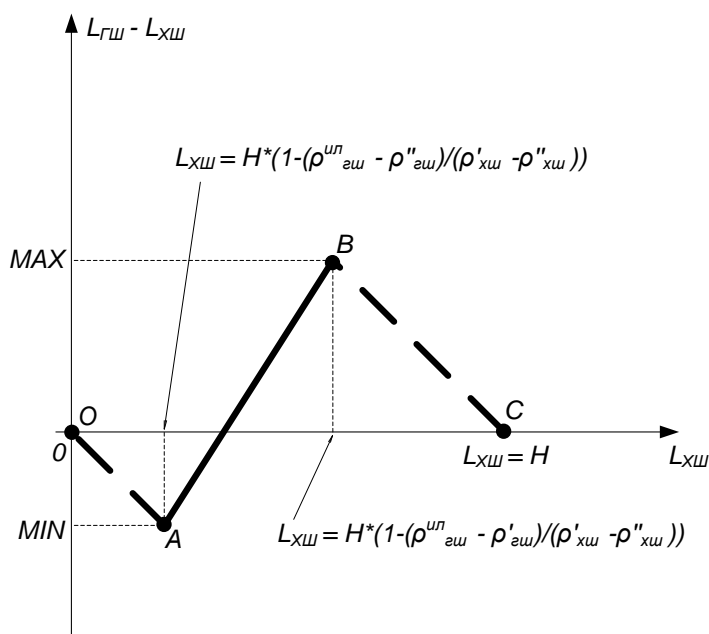


Рисунок 15 – График отклонений фактического значения уровня $L_{гш}$ от нескорректированных показаний канала $L_{хш}$ (для общего случая с применением УСО)

Отрезок АВ - часть графика, характеризующая действительное изменение отклонения показаний в зависимости от нескорректированного значения уровня $L_{хш}$; отрезки ОА и ВС являются условными продолжениями графика в областях изменений $L_{хш}$, которые выходят за граничные физические условия изменений перепада давлений ΔP на датчике

2.6 Температурная коррекция показаний на «горячую» шкалу (за счет поправочных коэффициентов, задаваемых в программно-техническом комплексе АСУ ТП)

Современный метод температурной коррекции для схем измерений с УСО и УСД (рис. 8, 9) заключается в пересчете показаний ИК уровня от «холодной» шкалы к «горячей» по формуле [1]:

$$L_{гш} = k \cdot (L_{хш} - h_0) + b + h_0. \quad (22)$$

где $L_{гш}$ – скорректированные показания ИК по «горячей» шкале,

$L_{хш}$ – показания ИК по «холодной» шкале,

k, b – поправочные коэффициенты на «горячую» шкалу,

h_0 – высота нижней врезки импульсной линии.

Формулы для расчета поправочных коэффициентов для случая УСО

$$k = \frac{(\rho'_{хи} - \rho''_{хи})}{\rho'_{жи} - \rho''_{жи}}, \quad (23)$$

$$b = \frac{H \cdot (\rho^{ул}_{жи} - \rho'_{хи} + \rho''_{хи} - \rho''_{жи})}{\rho'_{жи} - \rho''_{жи}}, \quad (24)$$

Входящие в данные уравнения значения плотности $\rho^{ул}_{жи}$, $\rho'_{жи}$, $\rho''_{жи}$ определяются по справочным данным А.А. Александрова, Б.А. Григорьева [3] или за счет непосредственного решения уравнений IAPWS-IF [4]. При этом $\rho'_{жи}$, $\rho''_{жи}$ определяются для номинальных значений температуры и давления в технологической емкости, $\rho^{ул}_{жи}$ — для номинального значения давления в технологической емкости и температуры плюсовой импульсной линии.

В тех случаях, когда распределение температурного поля по высоте импульсных линий не является равномерным, и импульсные линии находятся в разных температурных условиях, расчеты коэффициентов усложняются. Тогда, по результатам пирометрии по высоте ИЛ выделяются участки, на протяжении каждого из которых теплофизические характеристики среды допустимо считать одинаковыми (рис. 16).

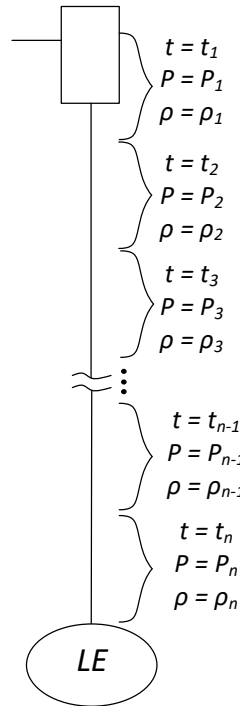


Рисунок 16 – Схема деления ИЛ на участки с одинаковыми характеристиками среды

В этом случае суммарное гидростатическое давление столба жидкости в импульсной линии рассчитывается следующим образом:

$$P = g \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot h_i, \quad (25)$$

где ρ_i – плотность среды на участке i ,

h_i – высота участка i ,

P – суммарное гидростатическое давление столба жидкости в ИЛ.

Плотность среды на каждом из участков ИЛ определяется для соответствующих значений температуры t_i и давления p_i . В свою очередь, давление на участке i складывается из давления внутри технологической емкости $P_{вн}$ и суммы гидростатических давлений вышестоящих участков в ИЛ. Таким образом, расчет суммарного гидростатического давления столба жидкости в ИЛ по формуле (25) осуществляется от верхних участков к нижним.

С учетом (25) формулы для расчета поправочных коэффициентов в общем случае для измерений с УСО принимают вид:

$$k = \frac{(\rho'_{xш} - \rho''_{xш})}{\rho'_{zш} - \rho''_{zш}},$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{zш}^{ул1} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{zш}^{ул1} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{zш}^{ул2} \cdot h_{\gamma} - H \cdot (\rho'_{xш} - \rho''_{xш} + \rho''_{zш})}{\rho'_{zш} - \rho''_{zш}}.$$

где H_i – длина участка i плюсовой ИЛ в пределах фактической базы ИК уровня ($\sum_{i=1}^n H_i = H$),

h_j – длина участка j плюсовой ИЛ в пределах ее высоты до минусового отбора импульса ($\sum_{j=1}^m h_j = h_1$),

h_{γ} – длина участка γ минусовой ИЛ в пределах ее высоты до минусового отбора импульса ($\sum_{\gamma=1}^k h_{\gamma} = h_1$).

Формулы для расчета поправочных коэффициентов для случая УСД

Применение УСД обеспечивает одинаковые температурные условия в плюсовой и минусовой импульсных линиях и тем самым исключает влияние неравномерного распределения температур на показания датчика.

$$k = \frac{(\rho'_{xш} - \rho''_{xш})}{\rho'_{zш} - \rho''_{zш}},$$

$$b = \frac{H \cdot (\rho'_{zш} - \rho'_{xш} + \rho''_{xш} - \rho''_{zш})}{\rho'_{zш} - \rho''_{zш}},$$

Реализация температурной коррекции показаний

Для удобства реализации температурной коррекции (на «горячую» шкалу) в программно-техническом комплексе АСУ ТП задается формула пересчета показаний (22) в виде:

$$L_{гш} = K \cdot L_{хш} + B, \quad (26)$$

где $K = k$;

$$B = -k \cdot h_0 + b + h_0.$$

На основе (26) коррекция показаний может осуществляться как в статике, так и в динамике. Для статической коррекции в ПТК вводятся поправочные коэффициенты K и B , заранее рассчитанные на определенные значения давления и температуры рабочей среды (рис. 17). Такой подход позволяет реализовать многорежимную коррекцию показаний, выполняя автоматические переключения по парам поправочных коэффициентов, соответствующих определенным значениям давления и температуры. Для исключения бросков показаний ИК переключения по поправочным коэффициентам может выполняться через двойное демпфирующее звено [13].

Для динамической коррекции показаний расчет поправочных коэффициентов выполняется непосредственно в ПТК путем непрерывного решения уравнений IAPWS-IF [3, 4] для текущих значений температуры и давления рабочей среды в технологической емкости (рис. 18).

С целью упрощения промышленных расчетов в случае динамической и статической коррекции поправочные коэффициенты K , B могут непосредственно определяться по справочным данным [1] для текущих значений температуры и давления рабочей среды. В таком случае выполнение промежуточных расчетов плотности воды и водяного пара не требуется.

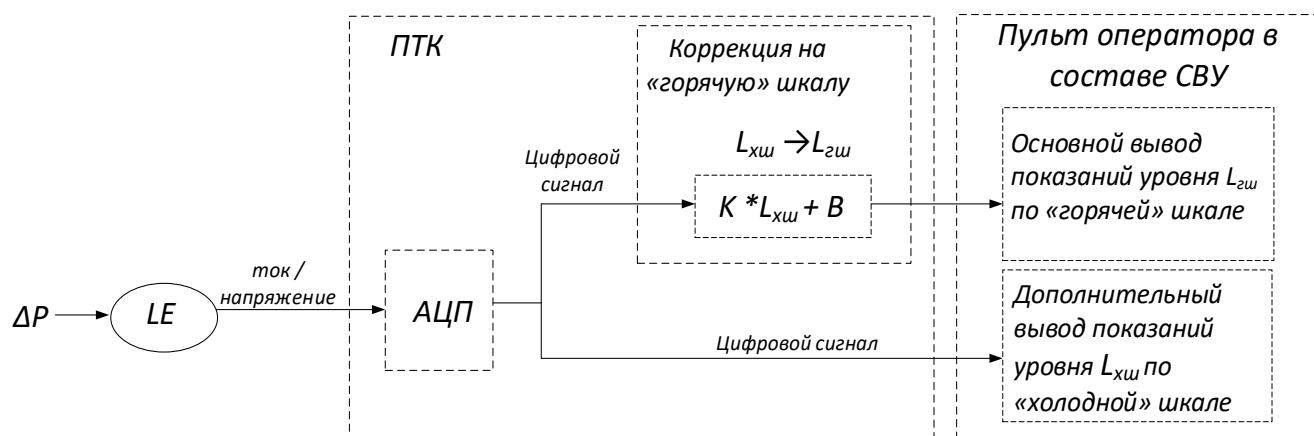


Рисунок 17 – Поясняющая схема обработки измерительного сигнала при коррекции на номинальные характеристики среды

ΔP – измеряемый перепад давлений; LE – датчик разности давлений, настроенный на «холодную» шкалу (согласно ГОСТ 22520); АЦП – аналого-цифровой преобразователь; $L_{хш}$ – показания уровня по «холодной» шкале; $L_{гш}$ – показания уровня по «горячей» шкале; СВУ – система верхнего уровня

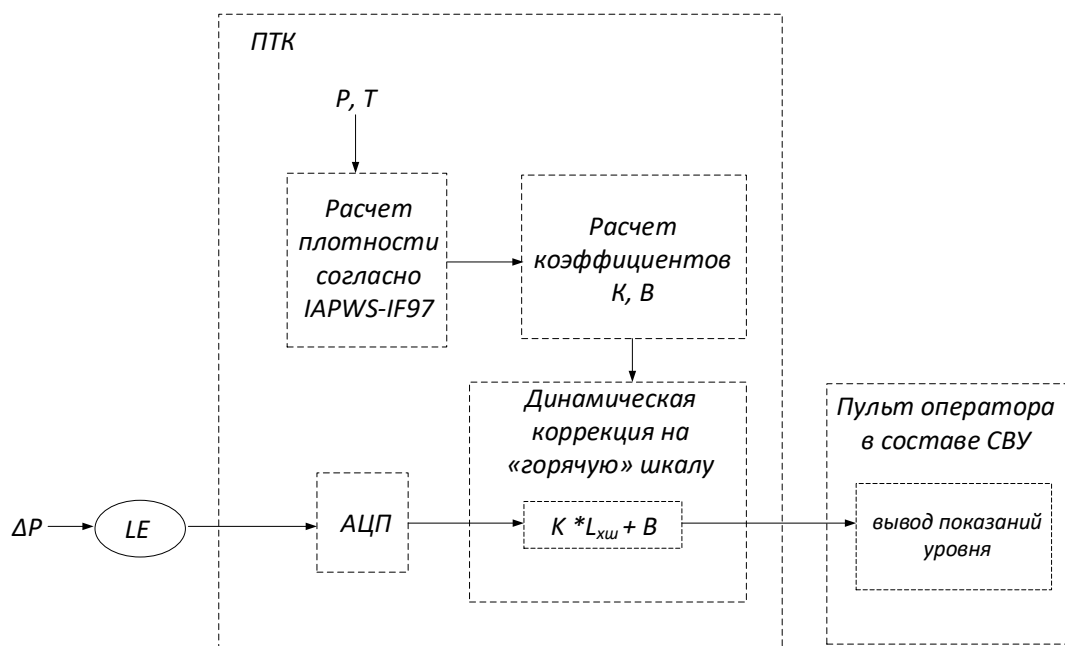


Рисунок 18 – Поясняющая схема обработки измерительного сигнала при динамической коррекции

P – текущее значение давления в технологической емкости; T – текущее значение температуры в технологической емкости

2.7 Температурная коррекция показаний на «горячую» шкалу (за счет индивидуальной настройки первично-измерительного преобразователя)

Если ПТК АСУ ТП не поддерживает выполнение арифметико-логических операций, или средства ПТК отсутствуют в структуре измерительного канала, то коррекция показаний осуществляется за счет индивидуальной настройки шкалы измерений первично-измерительного преобразователя (ПИП).

Порядок выполнения расчетов индивидуальной шкалы измерений ПИП для случая УСО

1) Определение нижнего и верхнего пределов «горячей» шкалы измерений ПИП [6]:

$$\Delta P_{\text{шк.min}} = \rho_{\text{гш}}^{\text{ул}} \cdot g \cdot H - \rho_{\text{гш}}' \cdot g \cdot H, \quad (27)$$

$$\Delta P_{\text{шк.max}} = \rho_{\text{гш}}^{\text{ул}} \cdot g \cdot H - \rho_{\text{гш}}'' \cdot g \cdot H, \quad (28)$$

где величины $\rho_{\text{гш}}^{\text{ул}}$, $\rho_{\text{гш}}''$, $\rho_{\text{гш}}'$ определяются по данным справочника [3] для соответствующих значений давления и температуры.

2) Определение нижнего и верхнего пределов шкалы измерений, задаваемых верхнем уровне АСУ ТП:

$$L_{\text{шк.max}} = H + h_0,$$

$$L_{\text{шк.min}} = h_0$$

Таким образом, для температурной коррекции показаний в случае УСО на первично-измерительном преобразователе настраивается шкала измерений со смещенным нулем.

Порядок выполнения расчетов индивидуальной шкалы измерений ПИП для случая УСД

1) Определение верхнего предела «горячей» шкалы измерений ПИП:

$$\Delta P_{\text{шк. min}} = 0$$

$$\Delta P_{\text{шк. max}} = \rho_{\text{жи}}^{\text{вл}} \cdot g \cdot H - \rho_{\text{жи}}^{\text{''}} \cdot g \cdot H,$$

2) Определение нижнего и верхнего пределов шкалы измерений, задаваемых на верхнем уровне АСУ ТП:

$$L_{\text{шк. max}} = H + h_0,$$

$$L_{\text{шк. min}} = h_0$$

В отличие от температурной коррекции на основе поправочных коэффициентов (п. 2.6), данный способ не позволяет реализовать настройку шкалы измерений согласно ГОСТ 22520 и обеспечивает достоверность показаний только для номинальных значений теплофизических характеристик рабочей среды. Для обеспечения достоверности показаний ИК при других режимах работы технологического оборудования потребуется перенастройка шкалы измерений датчика.

2.8 Коррекция показаний на гидростатическое давление столба жидкости в импульсной линии уровнемера

При измерении уровня в открытой технологической емкости с помощью датчика избыточного давления (ДИ) (рис. 10) коррекция показаний на гидростатическое давление столба жидкости в ИЛ осуществляется за счет соответствующего смещения шкалы измерений ИК уровня аналогично пункту 1.4.

Порядок выполнения расчетов шкалы измерений со сдвигом на гидростатическое давление столба жидкости в ИЛ

1) Определение максимального возможного избыточного давления на датчике ДИ:

$$P_{\text{max}} = \rho \cdot (L_{\text{max}} - h_0 + h_1) \cdot g$$

где ρ – плотность рабочей среды в технологической емкости и импульсной линии;

L_{max} – максимальное измеряемое верхнее значение уровня (с учетом высоты нижней врезки импульсной линии h_0);

h_1 – высота импульсной линии,

2) Выбор ближайшего значения верхнего предела шкалы измерений датчика ДИ из стандартного ряда значений согласно ГОСТ 22520 [3]:

$$P_{\text{шк. max}} \geq P_{\text{max}}$$

3) Определение нижнего и верхнего пределов шкалы измерений, задаваемых в ПТК:

$$L_{\text{шк. max}} = P_{\text{шк. max}} / (\rho \cdot g) + h_0 - h_1,$$

$$L_{\text{шк. min}} = h_0 - h_1.$$

4) Определение нижнего и верхнего пределов шкалы измерений, задаваемых в системе верхнего уровня (СВУ) из состава АСУ ТП:

$$L_{\text{сву min}} = h_0$$

$$L_{\text{сву max}} = L_{\text{max}}$$

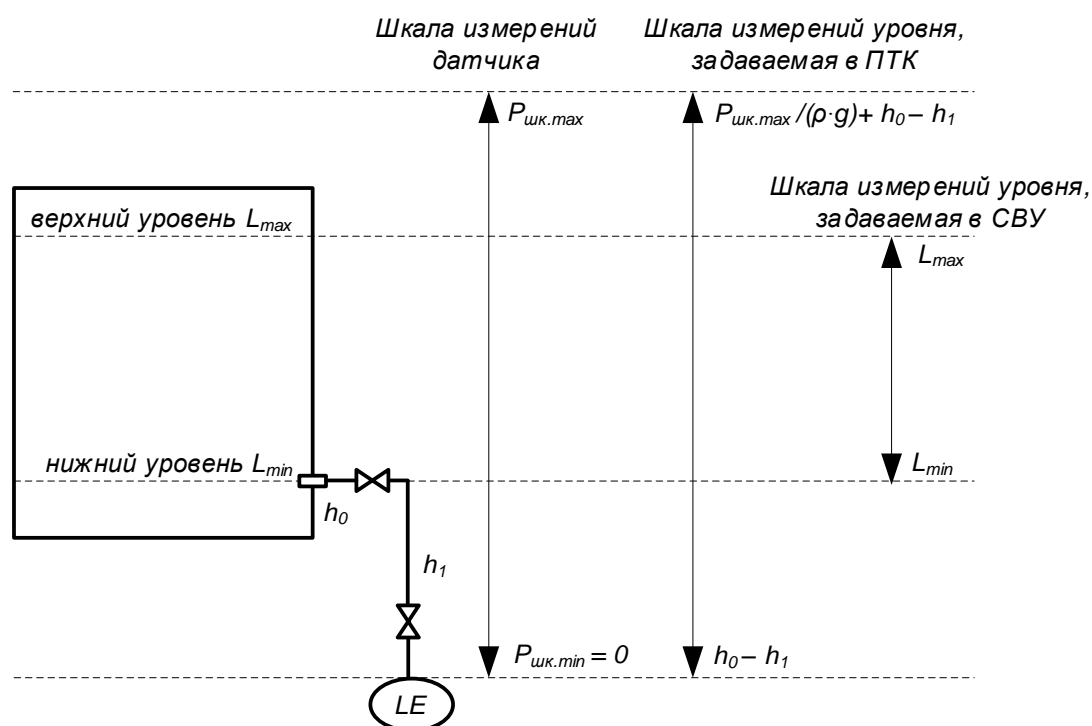


Рисунок 19 – Задаваемое соотношение шкал измерений для коррекции показаний уровня на гидростатическое давление столба жидкости в ИЛ

2.9 Коррекция показаний на номинальное значение плотности рабочей среды в открытой технологической емкости

Коррекция показаний на номинальное значение плотности рабочей среды в открытой технологической емкости происходит за счет перенастройки шкалы измерений ИК уровня.

Порядок выполнения расчетов шкалы измерений с учетом номинального значения плотности рабочей среды (для схемы измерений на рис. 11) следующий.

1) Определение максимального возможного перепада давлений на датчике ДД:

$$\Delta P_{\text{max}} = \rho_{\text{ном.}} \cdot g \cdot (L_{\text{max}} - h_0)$$

где $\rho_{\text{ном.}}$ – номинальное значение плотности рабочей среды в технологической емкости,

L_{max} – максимальное измеряемое верхнее значение уровня (с учетом высоты нижней врезки импульсной линии h_0);

2) Выбор ближайшего значения верхнего предела шкалы измерений датчика ДД из стандартного ряда согласно ГОСТ 22520 [6]:

$$\Delta P_{\text{шк. max}} \geq \Delta P_{\text{max}}$$

3) Определение нижнего и верхнего пределов шкалы измерений, задаваемых в ПТК:

$$L_{\text{шк. max}} = \Delta P_{\text{шк. max}} / (\rho_{\text{ном.}} \cdot g) + h_0,$$

$$L_{\text{шк. min}} = h_0.$$

4) Определение нижнего и верхнего пределов шкалы измерений, задаваемых в СВУ:

$$L_{\text{сву min}} = h_0$$

$$L_{\text{сву max}} = L_{\text{max}}$$

Выполнение расчетов шкалы измерений для остальных гидростатических схем измерений уровня в открытых технологических емкостях, представленных на рисунках 10 и 12, аналогично процедурам расчетов, описанным в пунктах 2.8 и 2.4 соответственно.

II ПРАКТИКУМ

Примеры решения задач

Задача № 1. *Рассчитать:*

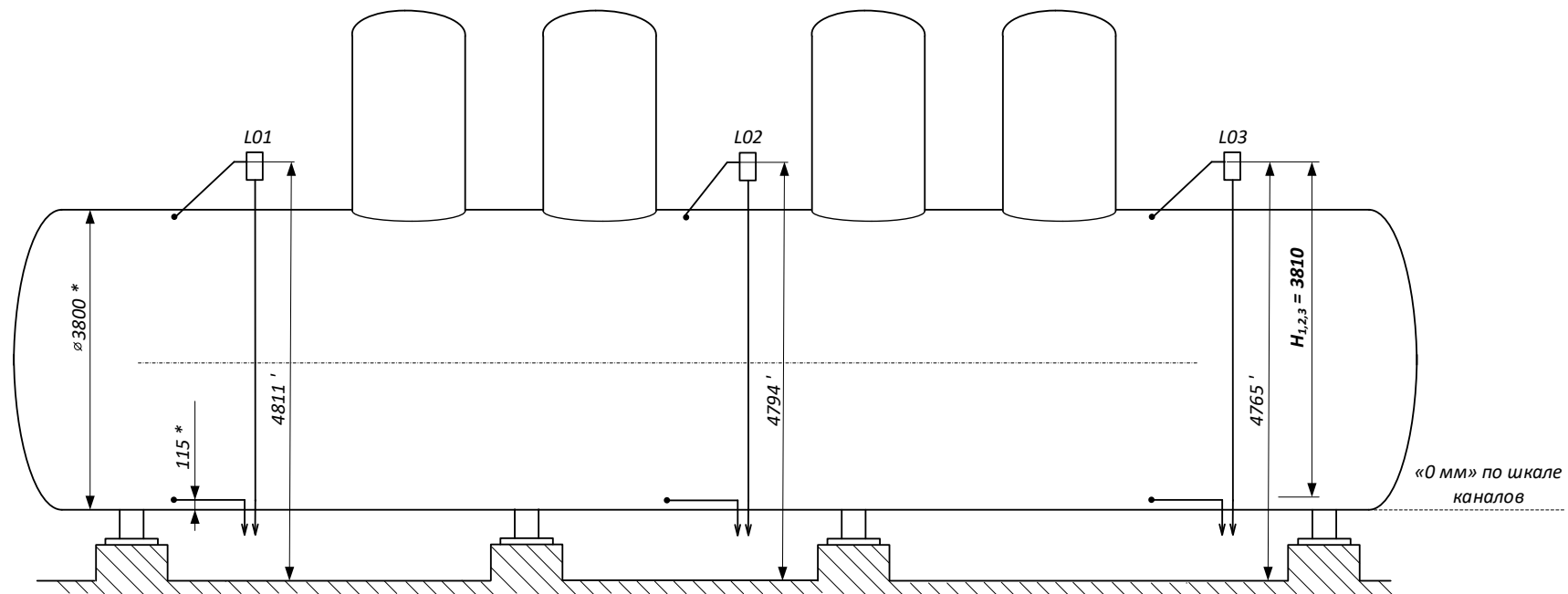
- «холодную» шкалу трех ИК уровня (L01-L03) в деаэраторе с учетом коррекции показаний на фактическую базу уровнемера,
 - максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
 - поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
 - градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале.
- Причем, градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА.

Исходные данные.

Измерения уровня выполняются датчиками разности давлений с выходной убывающей линейной токовой характеристикой 20-4 мА. Номинальное значение температуры в деаэраторе 174 °С (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе деаэратора на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в деаэраторе и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров представлены на эскизе деаэратора (рис. 21). За нулевое значение уровня по показаниям ИК принять внутреннюю образующую дна деаэратора.



Примечание:
 ' - результаты геодезических измерений;
 * - размер из конструкторской документации.

Рисунок 21 – Деаэратор

Решение.

1) Определим плотность рабочей среды для условий «холодной» и «горячей» шкалы по справочным данным Александрова, Григорьева [3].

Плотность воды для условия «холодной» шкалы: $\rho_{\text{хш}}' = 1 / V = 1 / 0,0010031 \approx 997$ кг/м³ (где V – удельный объем воды при температуре $t = 25$ °С и атмосферном давлении по справочной таблице «Термодинамические свойства воды и перегретого пара»).

Плотность воды для условия «горячей» шкалы: $\rho' = 1 / V' = 1 / 0,0011194 \approx 893,34$ кг/м³ (где V' – удельный объем воды в состоянии насыщения при температуре $t = 174$ °С по справочной таблице «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре)»).

Плотность пара для условия «горячей» шкалы: $\rho'' = 1 / V'' = 1 / 0,22153 \approx 4,514$ кг/м³ (где V'' – удельный объем пара в состоянии насыщения при температуре $t = 174$ °С по справочной таблице «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре)»).

Для определения плотности среды в ИЛ для случая «горячей» шкалы предварительно определяется номинальное давление в деаэраторе, которое соответствует состоянию насыщения воды и водяного пара при температуре 174 °С.

$P_{\text{ном}} = 0,872$ МПа – давление, соответствующее состоянию насыщения при температуре $t = 174$ °С (по справочной таблице «Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по температуре)»).

Зная $P_{\text{ном}}$, определяется плотность воды в импульсной линии для случая «горячей» шкалы. $\rho_{\text{гли}}^{\text{ил}} = 1 / V = 1 / 0,001002728 = 997,28$ кг/м³ (V – удельный объем воды при температуре окружающего воздуха $T = 25$ °С и $P = 0,872$ МПа – определен посредством линейной интерполяции справочных данных таблицы «Термодинамические свойства воды и перегретого пара»).

2) Из эскиза деаэратора с результатами геодезии (рис. 21) запишем данные необходимые для расчетов.

Фактическая база уровнемера $H = 3810$ мм.

Высота нижней врезки ИЛ от внутренней образующей дна деаэратора $h_0 = 115$ мм.

3) Определим «холодную» шкалу измерений ИК уровня в соответствии с процедурами выполнения расчетов, рассмотренными в п. 2.4.

С учетом фактического значения H рассчитаем максимальный перепад давления на датчике по «холодной» шкале: $\Delta P_{\text{max}} = \rho_{\text{хш}}' \cdot g \cdot H = 997 \cdot 9,819 \cdot 3,81 = 37,298$ кПа

Минимальный перепад давления на датчике по «холодной» шкале: $\Delta P_{\text{min х.ш.}} = 0$.

Исходя из рассчитанных перепадов давлений выбираем шкалу датчика в соответствии со стандартным рядом значений ГОСТ 22520 [6]. Ближайшим значением превышающим рассчитанное ΔP_{\max} является 40 кПа, следовательно, $\Delta P_{\max \text{ х.ш.}} = 40 \text{ кПа}$.

Таким образом, искомая шкала измерений датчика имеет пределы:

$$\Delta P_{\min \text{ х.ш.}} = 0;$$

$$\Delta P_{\max \text{ х.ш.}} = 40 \text{ кПа}.$$

Зная шкалу измерений датчика, рассчитаем выходную шкалу АЦП по схеме на рис. 14:

$$L_{\max \text{ ацп}} = H + h_0 = 3810 + 115 = 3925 \text{ мм};$$

$$L_{\min \text{ ацп}} = H + h_0 - (\Delta P_{\max \text{ х.ш.}} / (\rho_{\text{хш}}' \cdot g)) = 3,925 - (40\,000 / (997 \cdot 9,819)) \approx -161 \text{ мм}$$

Учитывая тот факт, что инверсия измерительного сигнала по условиям задачи выполнена за счет убывающей токовой характеристики датчика 20-4 мА, то шкала АЦП должна быть линейно возрастающей для исключения двойной инверсии измерительного сигнала и организации измерений уровня снизу-вверх (от дна до верхних уравнильных сосудов). Таким образом, входная шкала измерений АЦП должна быть следующая:

$$I_{\min \text{ ацп}} = 4 \text{ мА};$$

$$I_{\max \text{ ацп}} = 20 \text{ мА}.$$

По схеме на рис. 14 рассчитаем шкалу измерений, в пределах которой будет осуществляться отображение измеряемого параметра на мониторе оператора в составе СВУ.

$$L_{\max \text{ сву}} = H + h_0 = 3810 + 115 = 3925 \text{ мм};$$

$$L_{\min \text{ сву}} = h_0 = 115 \text{ мм}.$$

4) Определим минимальный и максимальный перепад давления на датчике для случая «горячей» шкалы по формулам (27), (28):

$$\Delta P_{\min \text{ г.ш.}} = \rho_{\text{гш}}^{\text{ул}} \cdot g \cdot H - \rho_{\text{гш}}' \cdot g \cdot H = (997,28 - 893,34) \cdot 9,819 \cdot 3,81 \approx 3,89 \text{ кПа}$$

$$\Delta P_{\max \text{ г.ш.}} = \rho_{\text{гш}}^{\text{ул}} \cdot g \cdot H - \rho_{\text{гш}}'' \cdot g \cdot H = (997,28 - 4,514) \cdot 9,819 \cdot 3,81 \approx 37,14 \text{ кПа}$$

5) Определим поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды.

Исходя из (23), (24) и (26), запишем формулы для расчетов поправочных коэффициентов в следующем виде:

$$K = \rho_{\text{хш}}' / (\rho' - \rho''),$$

$$b = H \cdot (\rho_{\text{гш}}^{\text{ул}} - \rho'' - \rho_{\text{хш}}') / (\rho' - \rho'') + h_0 \cdot (1 - K).$$

Подставляя соответствующие значения параметров, получим:

$$K = 997 / (893,34 - 4,514) \approx 1,1217$$

$$B = 3,81 \cdot (997,28 - 4,514 - 997) / (893,34 - 4,514) + 0,115 \cdot (1 - 1,1217) \approx -32 \text{ мм}$$

б) Определим градуировочную характеристику ИК уровня по «холодной» шкале.

Для вывода расчетных формул построим общий график линейной убывающей выходной токовой характеристики датчика (рис. 22).

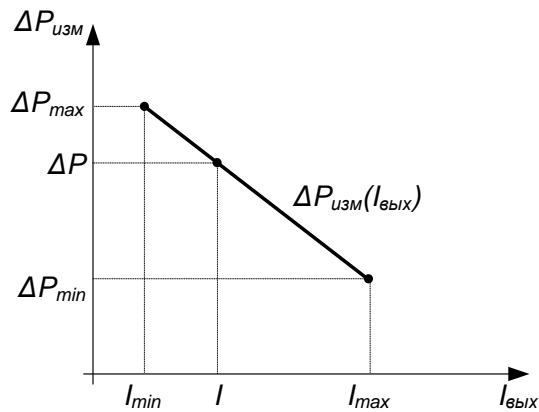


Рисунок 22 – График линейно-убывающей выходной токовой характеристики датчика от измеряемого перепада давления

$I_{вых}$ – токовый выходной сигнал датчика; $\Delta P_{изм}$ – перепад давления, измеряемый датчиком; I_{max} – максимальное значение выходного сигнала; I_{min} – минимальное значение выходного сигнала; I – текущее значение выходного сигнала; ΔP_{max} , ΔP_{min} – граничные значения настроенного диапазона измерений; ΔP – текущее измеряемое значение.

По данному графику из подобия треугольников найдем зависимость текущих значений ΔP от выходного токового сигнала датчика для составления градуировочной характеристики ИК уровня:

$$\Delta P = [(\Delta P_{max \text{ шк.}} - \Delta P_{min \text{ шк.}}) \cdot (I_{max} - I) / (I_{max} - I_{min})] + \Delta P_{min \text{ шк.}} \quad (32)$$

где $\Delta P_{min \text{ шк}}$ и $\Delta P_{max \text{ шк}}$ – нижний и верхний пределы шкалы измерений датчика.

С целью составления зависимости между значением уровня L по показаниям канала по «холодной» шкале от выходного токового сигнала датчика выполним следующее. Запишем уравнение (15) с учетом условия «холодной» шкалы (равенства плотности среды в импульсных линиях и технологической емкости $\rho_{ил1} = \rho_{ил2} = \rho_{ср} = \rho_{хш}$) в следующем виде [9]:

$$\Delta P = \rho_{хш} \cdot g \cdot (H - L) \quad (33)$$

Примечание: уравнение (33) является основным уравнением, которое широко применяется на практике для расчета перепада давлений на датчике в случае «холодной» шкалы для измерительных схем с УСО.

Подставив (32) в (33) и выразив переменную L с учетом смещения шкалы на высоту врезки h_0 , получим искомую зависимость:

$$L = H - \frac{(\Delta P_{\text{max шк.}} - \Delta P_{\text{min шк.}}) \cdot (I_{\text{max}} - I)}{(I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \cdot \rho_{\text{х.ш.}}' \cdot g} - \frac{\Delta P_{\text{min шк.}}}{\rho_{\text{х.ш.}}' \cdot g} + h_0 \quad (34)$$

Подставляя значения переменных в полученные формулы (32) и (34), рассчитывается градуировочная характеристика ИК уровня по «холодной» шкале для линейной убывающей выходной токовой характеристики датчика.

Выполняя такие расчеты с шагом выходного токового сигнала в 2 мА, градуировочную характеристику ИК уровня по «холодной» шкале удобно представить в следующем табличном виде:

Градуировочная характеристика ИК уровня по «холодной» шкале

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	40	35	30	25	20	15	10	5	0
$L, \text{мм}$	-161	350	861	1371	1882	2393	2904	3414	3925

7) Определим градуировочную характеристику ИК уровня по «горячей» шкале.

Так как датчик настраивается по «холодной» шкале, а коррекция на «горячую» осуществляется за счет поправочных коэффициентов K и B , то зависимость измеряемого перепада давления ΔP от выходного токового сигнала датчика I будет определяться соотношением (32), как и в предыдущем случае. Для расчета градуировочной характеристики остается найти зависимость показаний ИК уровня L по «горячей» шкале от I .

Для вывода искомой зависимости преобразуем уравнение (15) с учетом условия «горячей» шкалы (рабочая среда - двухфазная «вода-пар»; $\rho_{\text{ил1}} = \rho_{\text{ил2}} = \rho_{\text{сш}}^{\text{ул}}$) к следующему виду [9]:

$$\Delta P = \rho_{\text{сш}}^{\text{ул}} \cdot g \cdot H - (\rho' \cdot g \cdot L + \rho'' \cdot g \cdot (H - L)), \quad (35)$$

Примечание: уравнение (35) является основным уравнением, которое широко применяется на практике для расчета перепада давления на датчике по «горячей» шкале для измерительных схем с УСО в случае двухфазной рабочей среды. Справедливо при условии одинаковой плотности в минусовой и плюсовой импульсной линии на участке от датчика до нижней врезки в технологическую емкость. В случае неравномерности распределений температур в ИЛ, учитывая положения п. 2.6, уравнение (15), характеризующее перепад давления на датчике, преобразуется к виду [7]:

$$\Delta P = g \left(\sum_{i=1}^n \rho_{ил1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{ил1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{ил2\gamma} \cdot h_{\gamma} \right) - (\rho'_{гш} \cdot g \cdot L_{гш} + \rho''_{гш} \cdot g \cdot (H - L_{гш})), \quad (36)$$

где $\rho_{ил1i}$ – плотность воды в плюсовой ИЛ на текущем участке i ,

H_i – длина участка i плюсовой ИЛ в пределах фактической базы ИК уровня ($\sum_{i=1}^n H_i = H$),

$\rho_{ил1j}$ – плотность воды в плюсовой ИЛ на текущем участке j ,

h_j – длина участка j плюсовой ИЛ в пределах ее высоты до минусового отбора импульса ($\sum_{j=1}^m h_j = h_1$),

$\rho_{ил2\gamma}$ – плотность воды в минусовой ИЛ на текущем участке γ ,

h_{γ} – длина участка γ минусовой ИЛ в пределах ее высоты до минусового отбора импульса ($\sum_{\gamma=1}^k h_{\gamma} = h_1$).

На практике уравнение (36) применяется в редких случаях, например, когда результаты пирометрии импульсных линий показывают существенную разницу их температур, которая приводит к дополнительной систематической погрешности, превышающей допустимые нормы точности измерений на предприятии. В рамках решаемой задачи, исходя из условия одинаковых температур ИЛ, достаточно ограничиться уравнением (35).

Так, подставив (35) в (32), и выразив переменную L с учетом смещения шкалы на высоту врезки h_0 , получим искомую зависимость для расчета градуировочной характеристики ИК уровня в случае «горячей» шкалы:

$$L = \frac{\rho_{гш}^{ил} - \rho''}{\rho' - \rho''} H - \frac{(\Delta P_{шк.макс} - \Delta P_{шк.мин}) \cdot (I_{макс} - I_{вых})}{(I_{макс} - I_{мин}) \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g} - \frac{\Delta P_{шк.мин}}{(\rho' - \rho'') \cdot g} + h_0 \quad (37)$$

Подставляя значения переменных в формулы (32) и (37), рассчитывается градуировочная характеристика ИК уровня по «горячей» шкале для линейной убывающей выходной токовой характеристики датчика.

Выполняя такие расчеты с шагом выходного токового сигнала в 2 мА, градуировочную характеристику ИК уровня по «горячей» шкале удобно представить в следующем табличном виде.

Градуировочная характеристика ИК уровня по «горячей» шкале

$I_{вых}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	40	35	30	25	20	15	10	5	0
$L, \text{мм}$	-213	360	934	1506	2079	2652	3225	3797	4371

Выполнить проверку полученной характеристики ИК уровня по «горячей» шкале можно путем пересчета значений L из градуировочной характеристики по «холодной» шкале на «горячую» за счет рассчитанных поправочных коэффициентов K и B . Соответственно, таким образом можно проверять и расчеты самих поправочных коэффициентов. Причем, чтобы обеспечить сходимость результатов до единиц миллиметров, рекомендуется использовать точные значения рассчитанных поправочных коэффициентов и значений плотностей без приближений. Для удобства все расчеты можно выполнять с применением прикладного программного обеспечения, например, MS Excel.

Выполняя такую проверку, получим следующие результаты:

$L_{х.ш.}, \text{ мм}$	-161	350	861	1371	1882	2393	2904	3414	3925
K	1,12171								
$B, \text{ мм}$	-32,15039168								
$L_{г.ш.} = L_{х.ш.} \cdot K + B, \text{ мм}$	-213	360	934	1506	2079	2652	3225	3797	4371

Сравнивая значения $L_{г.ш.}$ со значениями L в градуировочной характеристике ИК уровня по «горячей» шкале, подтверждается абсолютная сходимость результатов. Следовательно, подтверждается правильность выполненных расчетов в рамках заданного условия задачи.

Ответ:

Результаты расчетов параметров ИК уровня по «холодной» шкале:

- максимальный перепад на датчике 37,298 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 40 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 161 до плюс 3925 мм;
- диапазон измерений СВУ..... от 115 до 3925 мм.

Результаты расчетов коррекции показаний ИК уровня на «горячую» шкалу:

- максимальный перепад на датчике 37,14 кПа;
- минимальный перепад на датчике 3,89 кПа;
- поправочные коэффициенты $K = 1,1217$; $B = -32 \text{ мм}$.

Табличный вид градуировочной характеристики ИК уровня по «холодной» шкале

$I_{\text{вых}}, \text{ мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{ кПа}$	40	35	30	25	20	15	10	5	0
$L, \text{ мм}$	-161	350	861	1371	1882	2393	2904	3414	3925

Табличный вид градуировочной характеристики ИК уровня по «горячей» шкале

$I_{\text{вых}}, \text{ мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{ кПа}$	40	35	30	25	20	15	10	5	0
$L, \text{ мм}$	-213	360	933	1506	2079	2652	3225	3798	4371

Задача № 2. *Рассчитать:*

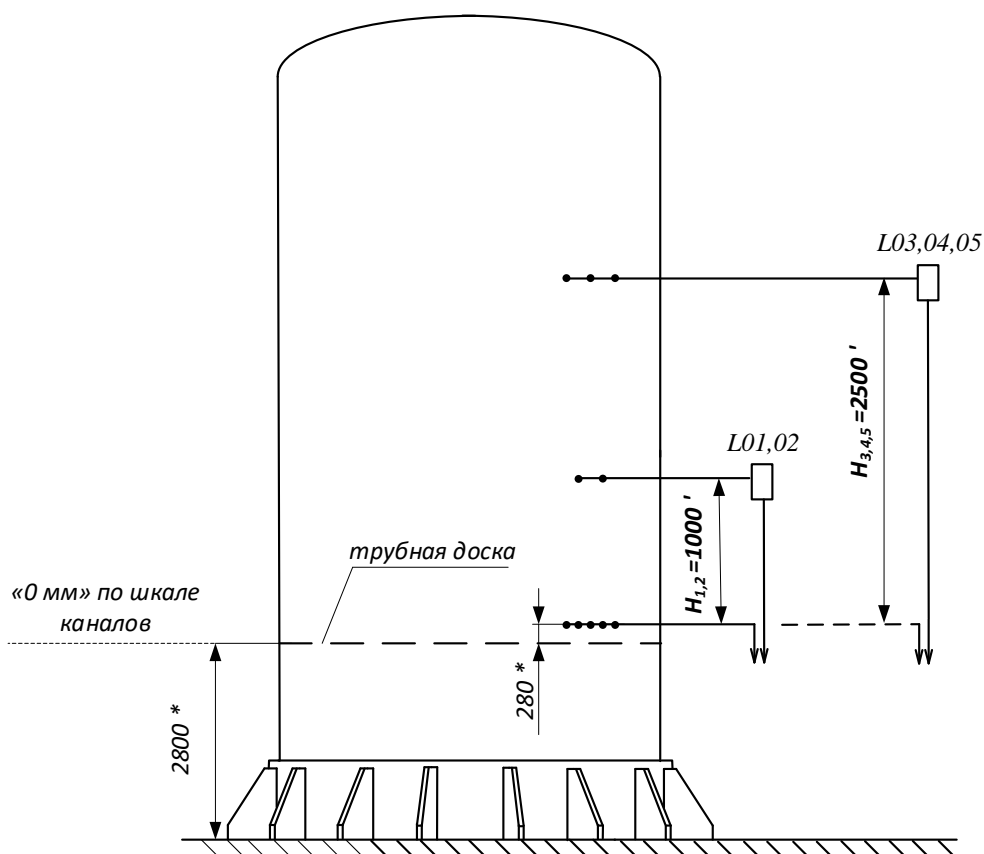
- «холодную» шкалу пяти ИК уровня (L01-L05) в подогревателе высокого давления (ПВД-6) с учетом коррекции показаний на фактическую базу уровнемера,
- поправочные коэффициенты K и B измерительных каналов уровня в ПВД-6 на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды.

Исходные данные.

Измерения уровня выполняются пятью датчиками разности давлений (L01-L05) с выходной убывающей линейной токовой характеристикой 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в ПВД-6 составляет 2,61 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе ПВД-6 на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в ПВД-6 и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров представлены на эскизе ПВД-6 (рис. 23). За нулевое значение уровня по показаниям ИК уровня принять «зеркало» трубной доски (верхнюю образующую трубной доски).



Примечание:

* - размеры по конструкторской документации

' - усредненные результаты геодезических измерений

Рисунок 23 – Эскиз ПВД-6

Решение.

1) Определим исходные данные для расчетов параметров ИК по «холодной» шкале.

Плотность воды для условия «холодной» шкалы: $\rho_{\text{хш}}' = 1 / V = 1 / 0,0010031 \approx 997$ кг/м³ (где V – удельный объем воды при температуре $t = 25$ °С и атмосферном давлении по справочным данным [3] таблицы «Термодинамические свойства воды и перегретого пара»).

Из эскиза ПВД-6 (рис. 23) определяем геометрические характеристики:

- Фактическая база уровнемеров L01, L02: $H_{1,2} = 1000$ мм;
- Фактическая база уровнемеров L03, L04, L05: $H_{3-5} = 2500$ мм;
- Высота нижних врезок импульсных линий всех уровнемеров до «зеркала» трубной доски: $h_0 = 280$ мм.

2) Выполним расчеты параметров ИК уровня по «холодной» шкале в соответствии с процедурами выполнения расчетов, рассмотренными в п. 2.4.

Максимальный перепад давления на датчиках L01, L02:

$$\Delta P_{\text{max}} = \rho_{\text{хш}}' \cdot g \cdot H = 997 \cdot 9,819 \cdot 1 \approx 9,79 \text{ кПа.}$$

Максимальный перепад давления на датчиках L03, L04, L05:

$$\Delta P_{\max} = \rho_{\text{хш}} \cdot g \cdot H = 997 \cdot 9,819 \cdot 2,5 \approx 24,474 \text{ кПа.}$$

Выбор шкалы измерений из значений стандартного ряда ГОСТ 22520:

- для уровнемеров L01, L02: $\Delta P_{\min \text{ шк.}} = 0$; $\Delta P_{\max \text{ шк.}} = 10 \text{ кПа}$;
- для уровнемеров L03, L04, L05: $\Delta P_{\min \text{ шк.}} = 0$; $\Delta P_{\max \text{ шк.}} = 25 \text{ кПа}$;

Входная шкала АЦП для всех уровнемеров: линейно возрастающая 4-20мА.

Расчет выходной шкалы АЦП для уровнемеров L01, L02:

$$L_{\max \text{ ацп}} = H + h_0 = 1000 + 280 = 1280 \text{ мм};$$

$$L_{\min \text{ ацп}} = H + h_0 - (\Delta P_{\max \text{ шк.}} / (\rho_{\text{хш}} \cdot g)) = 1,28 - (10\,000 / (997 \cdot 9,819)) \approx - 259 \text{ мм}$$

Расчет выходной шкалы АЦП для уровнемеров L03, L04, L05:

$$L_{\max \text{ ацп}} = H + h_0 = 2500 + 280 = 2780 \text{ мм};$$

$$L_{\min \text{ ацп}} = H + h_0 - (\Delta P_{\max \text{ шк.}} / (\rho_{\text{хш}} \cdot g)) = 2,78 - (25\,000 / (997 \cdot 9,819)) \approx - 226 \text{ мм}$$

Расчет шкалы измерительных каналов L01, L02, задаваемой на СВУ:

$$L_{\max \text{ сву}} = H + h_0 = 1000 + 280 = 1280 \text{ мм};$$

$$L_{\min \text{ сву}} = h_0 = 280 \text{ мм.}$$

Расчет шкалы измерительных каналов L03, L04, L05, задаваемой на СВУ:

$$L_{\max \text{ сву}} = H + h_0 = 2500 + 280 = 2780 \text{ мм};$$

$$L_{\min \text{ сву}} = h_0 = 280 \text{ мм.}$$

3) Определим поправочные коэффициенты ИК уровня по «горячей» шкале для номинального значения давления рабочей среды.

С целью упрощения расчетов воспользуемся специализированным «Справочником по настройке промышленных гидростатических уровнемеров» [1].

Определяем поправочный коэффициент K для всех уровнемеров L01- L05:

$K = K_1 + 1 = 0,217300247 + 1 \approx 1,2173$ (где K_1 – справочное значение – определено для абсолютного давления среды 2,61 МПа посредством линейной интерполяции справочных данных «Таблицы значений максимальной погрешности и поправочных коэффициентов для состояния насыщения воды (по давлению)»)

Примечание: поправочный коэффициент для всех уровнемеров получается одинаковым, так как он зависит только от характеристик рабочей среды в технологической емкости.

Определяем поправочный коэффициент B для уровнемеров L01, L02:

$$B = -K \cdot h_0 + B_1 \cdot H + h_0 = -1,2173 \cdot 0,28 + (-0,014586498) \cdot 1 + 0,28 \approx - 75 \text{ мм}$$

(B_1 – справочное значение – определено для абсолютного давления среды 2,61 МПа посредством линейной интерполяции справочных данных «Таблицы значений

максимальной погрешности и поправочных коэффициентов для состояния насыщения воды (по давлению)»)

Определяем поправочный коэффициент B для уровнемеров L03, L04, L05:

$$B = -K \cdot h_0 + B_1 \cdot H + h_0 = -1,2173 \cdot 0,28 + (-0,014586498) \cdot 2,5 + 0,28 \approx -97 \text{ мм.}$$

Ответ:

Результаты расчетов параметров по «холодной» шкале для ИК L01, L02:

- максимальный перепад на датчике 9,79 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 10 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,259 до 1,28 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,28 до 1,28 м.

Результаты расчетов параметров по «холодной» шкале для ИК L03, L04, L05:

- максимальный перепад на датчике 24,474 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 25 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,226 до 2,78 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,28 до 2,78 м.

Поправочные коэффициенты на «горячую» шкалу ИК L01, L02: $K = 1,2173$; $B = -97$ мм.

Поправочные коэффициенты на «горячую» шкалу ИК L03, L04, L05: $K = 1,2173$; $B = -97$ мм.

Задачи по расчету настроечных параметров и функций коррекции показаний ИК уровня

Задача № 3. *Рассчитать:*

- «холодную» шкалу для пяти ИК уровня (L01-L05) в подогревателе высокого давления (ПВД-5) с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

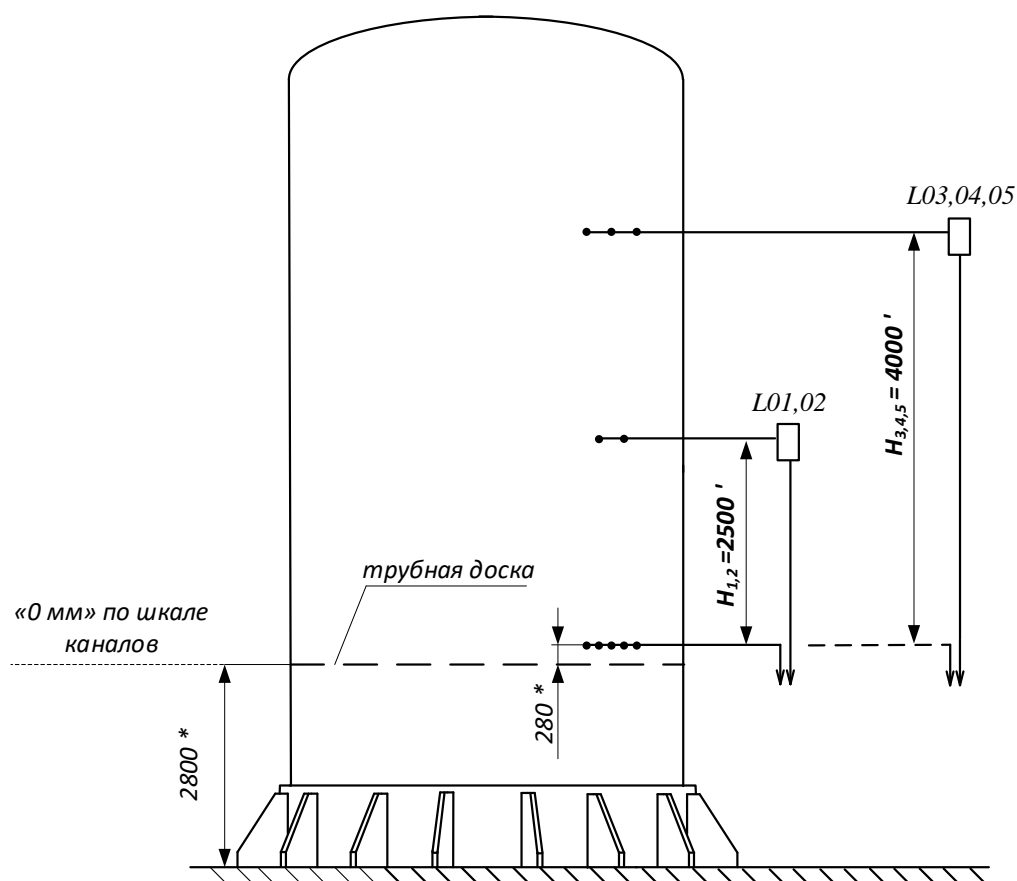
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются пятью датчиками разности давлений (L01-L05), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в ПВД-5 составляет 1,887 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе ПВД-5 на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в ПВД-5 и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров L01-L05 представлены на эскизе ПВД-5 (рис. 24). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемеров принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

- * - размеры в соответствии с конструкторской документацией
- ' - усредненные результаты геодезических измерений

Рисунок 24 – Эскиз ПВД-5

Задача № 4. *Рассчитать:*

- «холодную» шкалу для четырех ИК уровня (L01-L04) в подогревателе низкого давления (ПНД-3) с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

Исходные данные.

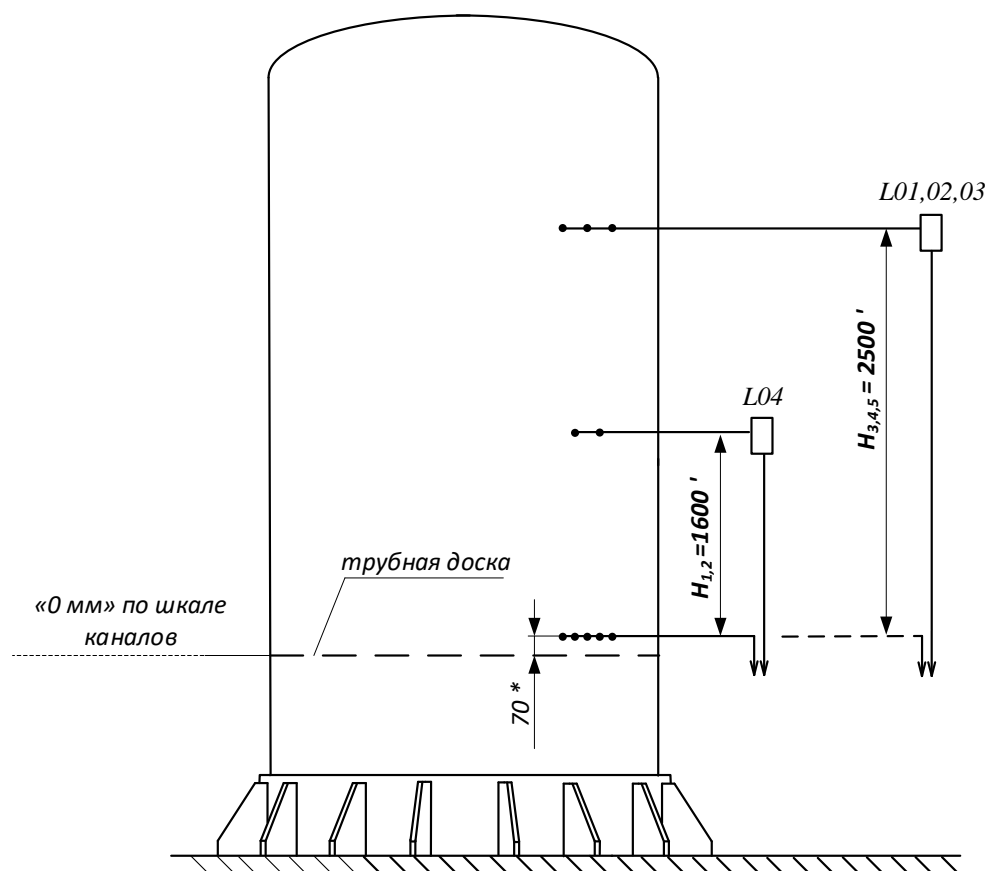
Измерения уровня выполняются четырьмя датчиками разности давлений (L01-L04), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в ПНД-3 составляет 0,14 МПа (рабочая среда

двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе ПНД-3 на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в ПНД-3 и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров L01-L04 представлены на эскизе ПНД-3 (рис. 25). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемеров принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

* - размеры в соответствии с конструкторской документацией

' - усредненные результаты геодезических измерений

Рисунок 25 – Эскиз ПНД-3

Задача № 5. Рассчитать:

- «холодную» шкалу для четырех ИК уровня (L01-L04) в подогревателе низкого давления (ПНД-4) с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,

- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

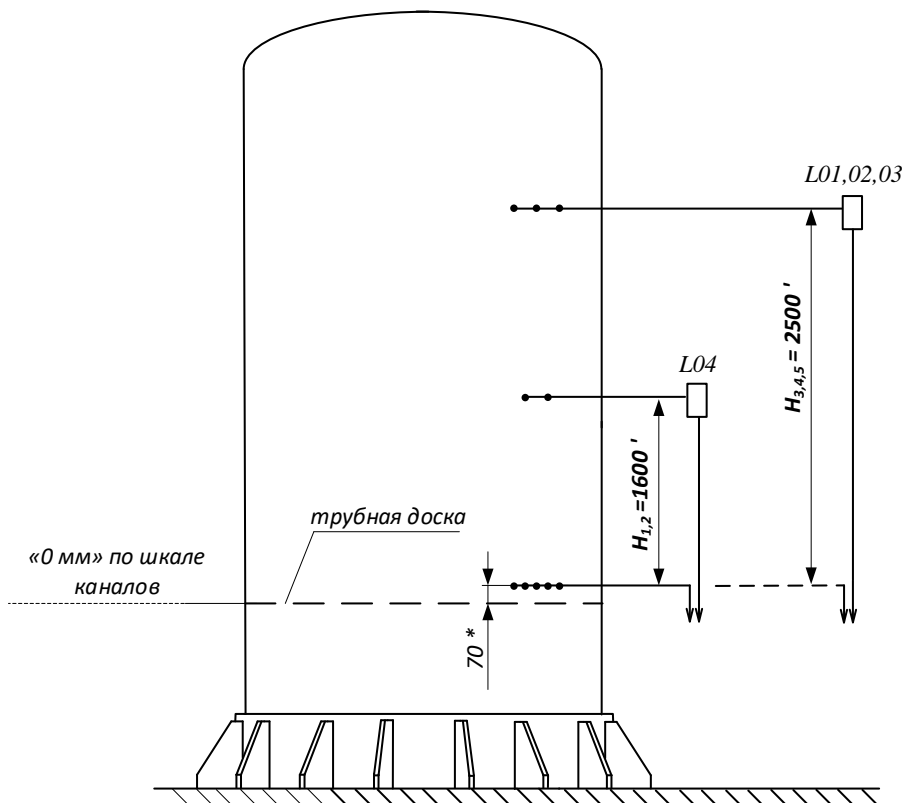
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются четырьмя датчиками разности давлений (L01-L04), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в ПНД-4 составляет 0,544 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе ПНД-4 на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в ПНД-4 и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров L01-L04 представлены на эскизе ПНД-4 (рис. 26). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемеров принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

- * - размеры в соответствии с конструкторской документацией
- ' - усредненные результаты геодезических измерений

Рисунок 26 – Эскиз ПНД-4

Задача № 6. *Рассчитать:*

- «холодную» шкалу для четырех ИК уровня (L01-L04) в сепаратороперегревателе (СПП) с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

Исходные данные.

Измерения уровня выполняются четырьмя датчиками разности давлений (L01-L04), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в СПП составляет 0,581 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе СПП на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в СПП и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров L01-L04 представлены на эскизе СПП (рис. 27). Нулевые значения «0 мм» по показаниям уровнемеров принять по соответствующим отметкам, указанным на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.

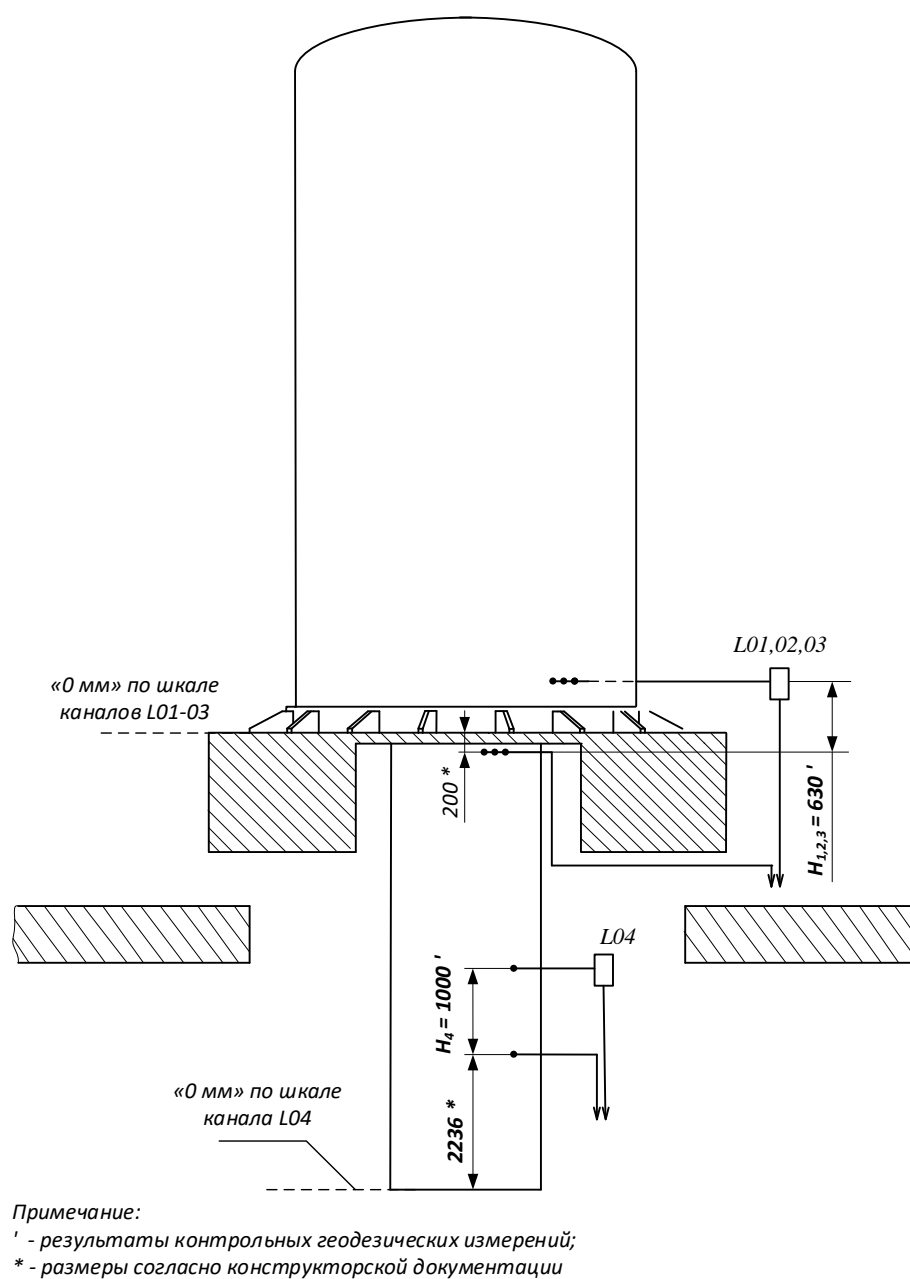


Рисунок 27 – Эскиз СПП

Задача № 7. Рассчитать:

- «холодную» шкалу для трех ИК уровня (L01-L03) в конденсатосборнике СПП-1А с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

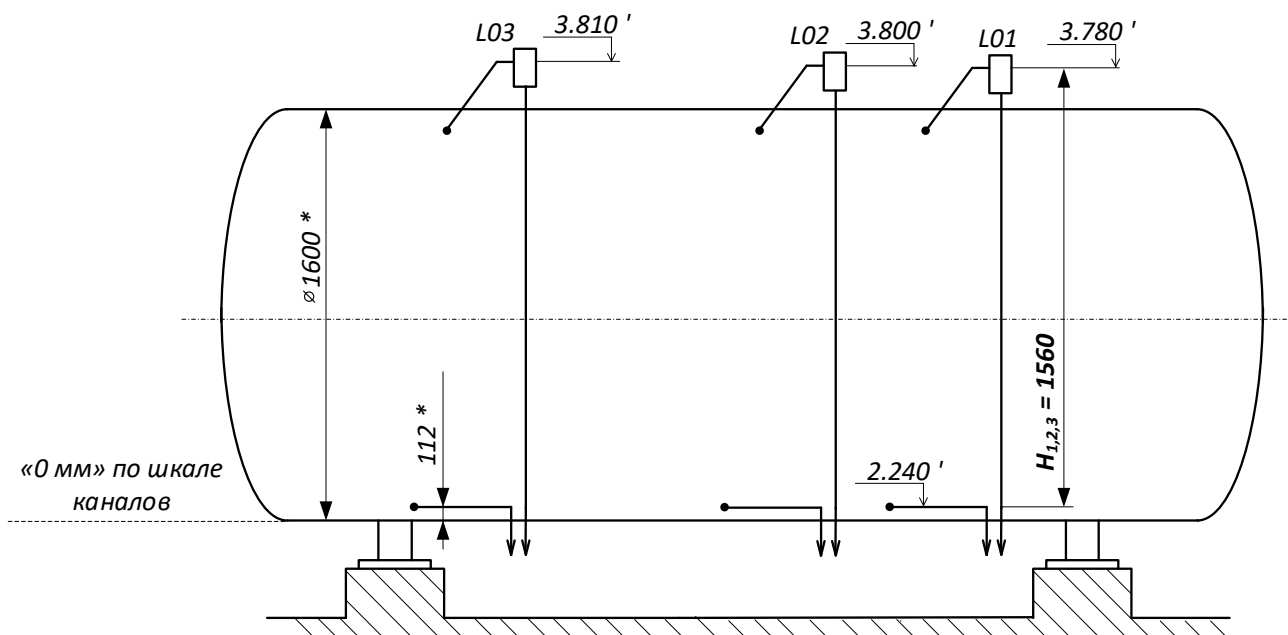
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются тремя датчиками разности давлений (L01-L03), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в конденсаторе СПП-1А составляет 2,719 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе конденсаторе СПП-1А на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в конденсаторе СПП-1А и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров L01-L03 представлены на эскизе конденсаторе СПП-1А (рис. 28). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемеров принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

- ' - усредненные результаты геодезических измерений;
- * - размеры согласно конструкторской документации

Рисунок 28 – Конденсаторе СПП-1А

Задача № 8. Рассчитать:

- «холодную» шкалу для трех ИК уровня (L01-L03) в конденсаторе СПП-1Б с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,

— градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

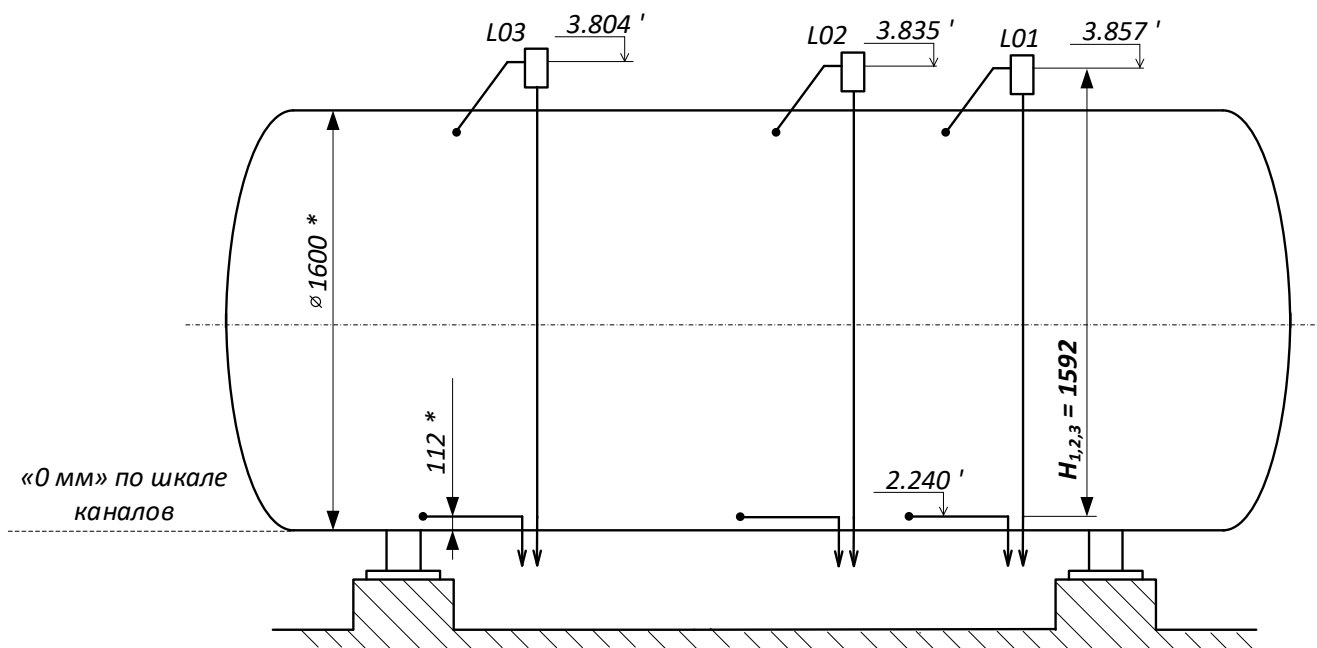
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются тремя датчиками разности давлений (L01-L03), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в конденсатосборнике СПП-1Б составляет 2,719 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе конденсатосборника СПП-1Б на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в конденсатосборнике СПП-1Б и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров L01-L03 представлены на эскизе конденсатосборника СПП-1Б (рис. 29). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемеров принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

' - усредненные результаты геодезических измерений;

* - размеры согласно конструкторской документации

Рисунок 29 – Конденсатосборник СПП-1Б

Задача № 9. *Рассчитать:*

— «холодную» шкалу для трех ИК уровня (L01-L03) в конденсатосборнике СПП-2А с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,

- Исходные данные.*

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



' - усредненные результаты геодезических измерений;

* - размеры согласно конструкторской документации.

Рисунок 30 – Конденсатосборник СПП-2А

Задача № 10. Рассчитать:

- «холодную» шкалу для трех ИК уровня (L01-L03) в конденсатосборнике СПП-2Б с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

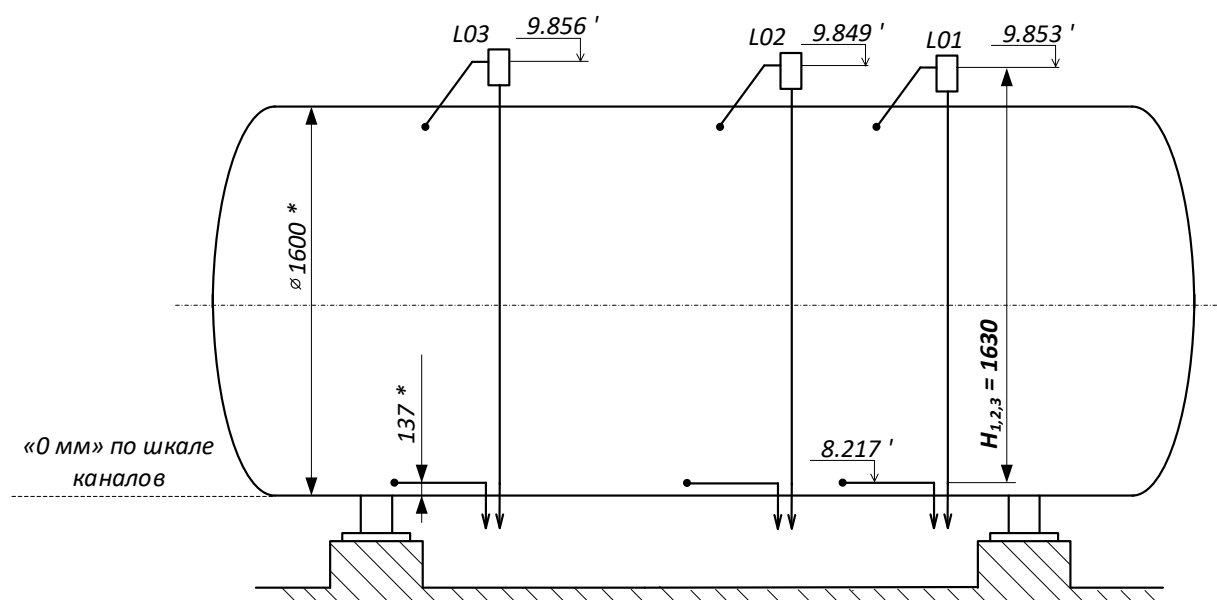
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются тремя датчиками разности давлений (L01-L03), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в конденсатосборнике СПП-2Б составляет 6,565 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе в конденсатосборника СПП-2Б на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в конденсатосборнике СПП-2Б и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров L01-L03 представлены на эскизе конденсатосборника СПП-2Б (рис. 31). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемеров принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

' - усредненные результаты геодезических измерений;

* - размеры согласно конструкторской документации

Рисунок 31 – Конденсатосборник СПП-2Б

Задача № 11. Рассчитать:

- «холодную» шкалу для пяти ИК уровня (L01-L05) в сепаратосборнике СПП с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

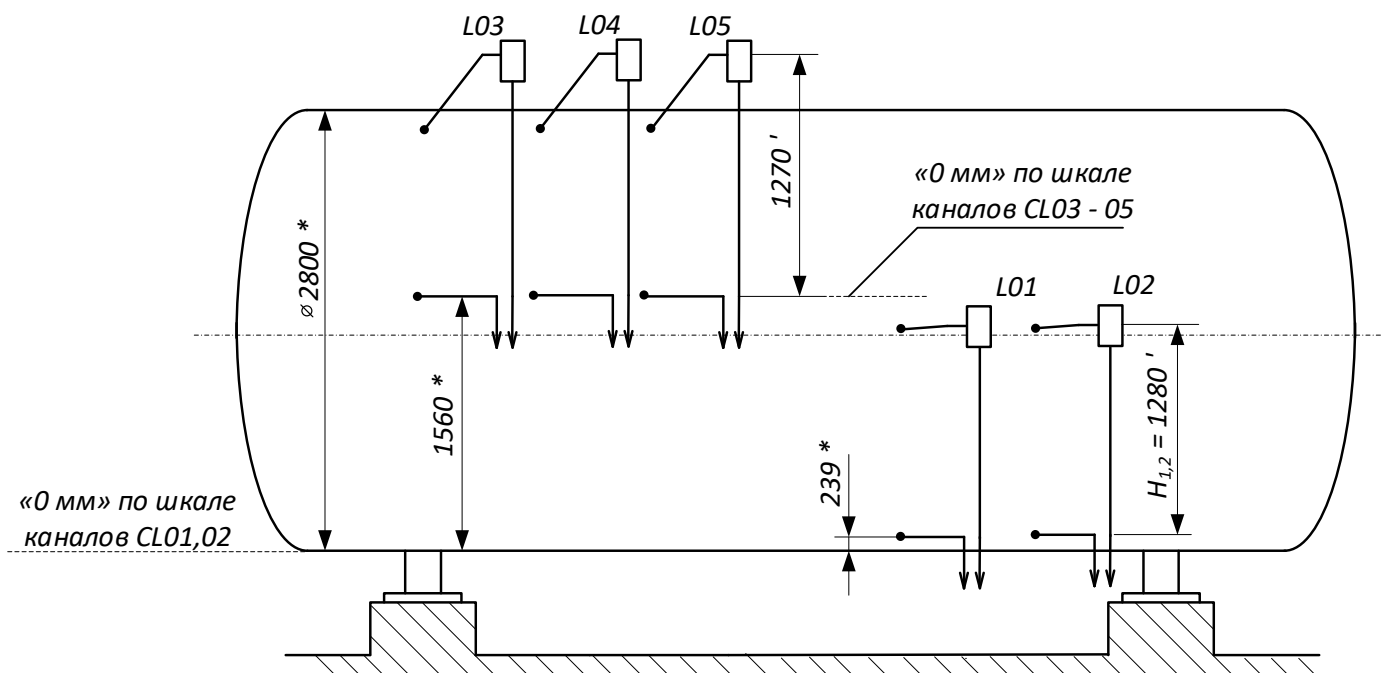
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются пятью датчиками разности давлений (L01-L05), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в сепаратосборнике СПП составляет 0,581 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе сепаратосборника СПП на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в сепаратосборнике СПП и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров L01-L05 представлены на эскизе сепаратосборника СПП (рис. 32). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемеров принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

- ' - усредненные результаты геодезических измерений;
- * - размеры согласно конструкторской документации

Рисунок 32 – Сепаратосборник СПП

Задача № 12. Рассчитать:

- «холодную» шкалу для ИК уровня в разделителе 1 с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

Исходные данные.

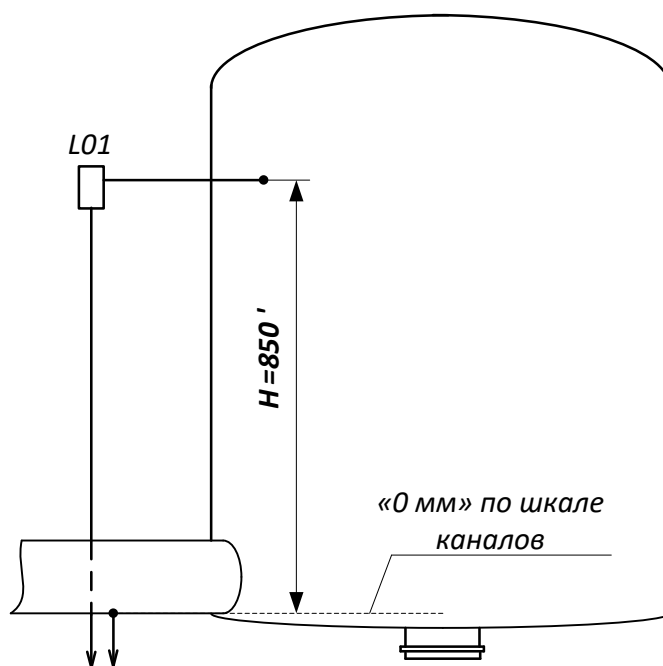
Измерения уровня выполняются датчиком разности давлений, который имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в разделителе 1 составляет 0,581 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий

при работе разделителя 1 на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в разделителе 1 и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемера представлены на эскизе разделителя 1 (рис. 33). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемера принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчика выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

' - усредненное значение результатов геодезии

Рисунок 33 – Разделитель

Задача № 13. *Рассчитать:*

- «холодную» шкалу для ИК уровня в разделителе 2 с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

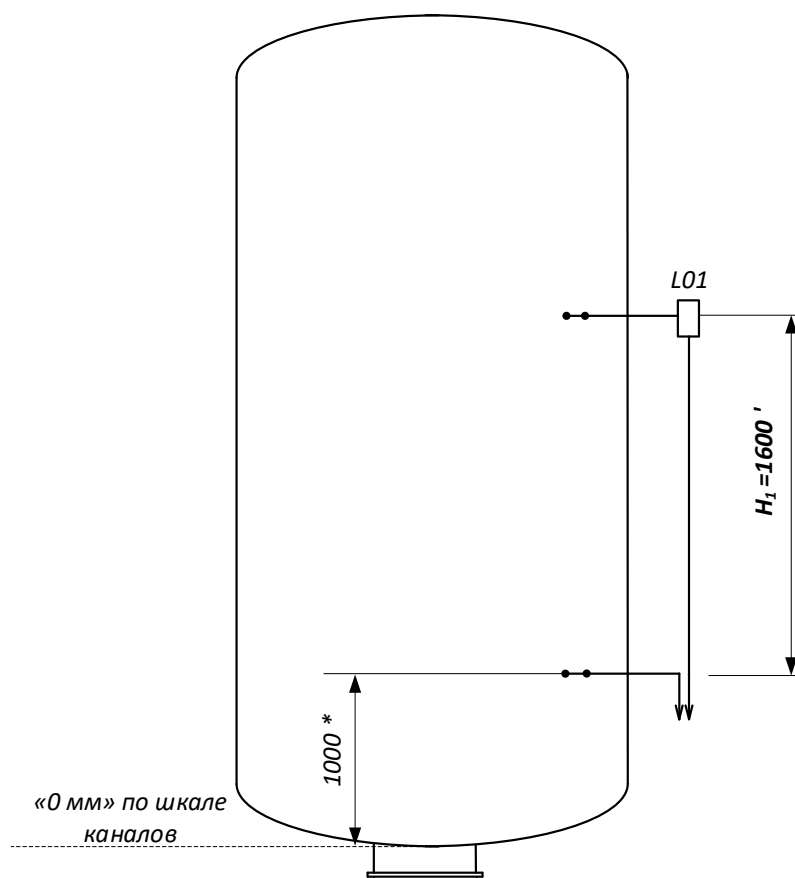
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются датчиком разности давлений, который имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в разделителе 2 составляет 0,581 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе разделителя 2 на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в разделителе 2 и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемера представлены на эскизе разделителя 2 (рис. 34). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемера принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

' - усредненное значение результатов геодезии

** - размеры согласно конструкторской документации*

Рисунок 34 – Разделитель

Задача № 14. *Рассчитать:*

- «холодную» шкалу для ИК уровня в расширителе дренажей с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

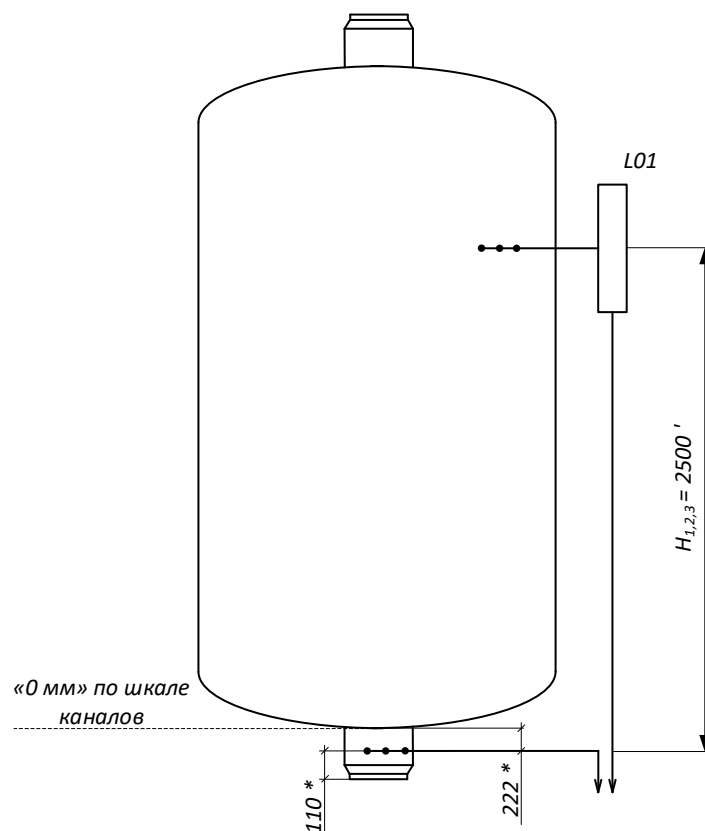
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются датчиком разности давлений, который имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение температуры в расширителе дренажей составляет 284 °С (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе расширителя дренажей на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в расширителе дренажей и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемера представлены на эскизе расширителя дренажей (рис. 35). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемера принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчика выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

' - усредненное значение результатов геодезии

* - размеры согласно конструкторской документации

Рисунок 35 – Расширитель дренажей

Задача № 15. *Рассчитать:*

- «холодную» шкалу для четырех ИК уровня (L01-L04) в подогревателе сетевой воды (ПСВ-1) с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

Исходные данные.

Измерения уровня выполняются четырьмя датчиками разности давлений (L01-L04), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в ПСВ-1 составляет 0,121 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе ПСВ-1 на номинальных параметрах составляет 25 °С.

- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

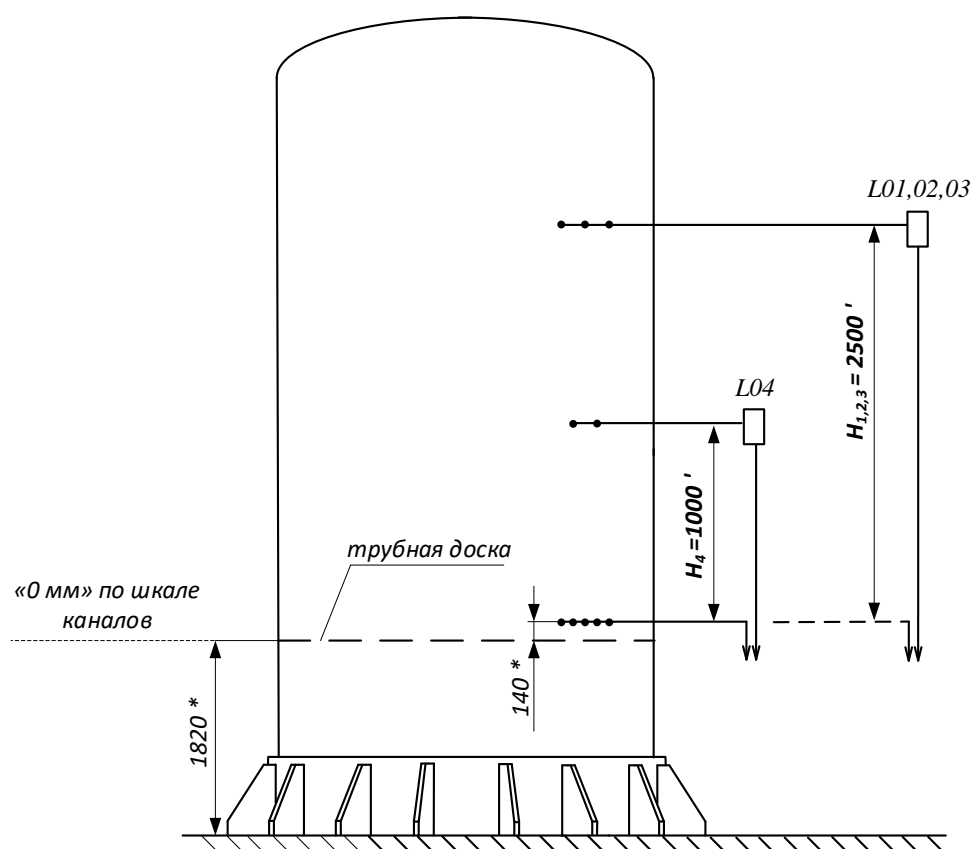
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются четырьмя датчиками разности давлений (L01-L04), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в ПСВ-2 составляет 0,469 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе ПСВ-2 на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в ПСВ-2 и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров L01-L04 представлены на эскизе ПСВ-2 (рис. 37). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемеров принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

* - размеры согласно конструкторской документации

' - усредненные результаты геодезических измерений

Рисунок 37 – PCB-2

Задача № 17. Рассчитать:

- «холодную» шкалу для четырех ИК уровня (L01-L04) в подогревателе сетевой воды (PCB-3) с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

Исходные данные.

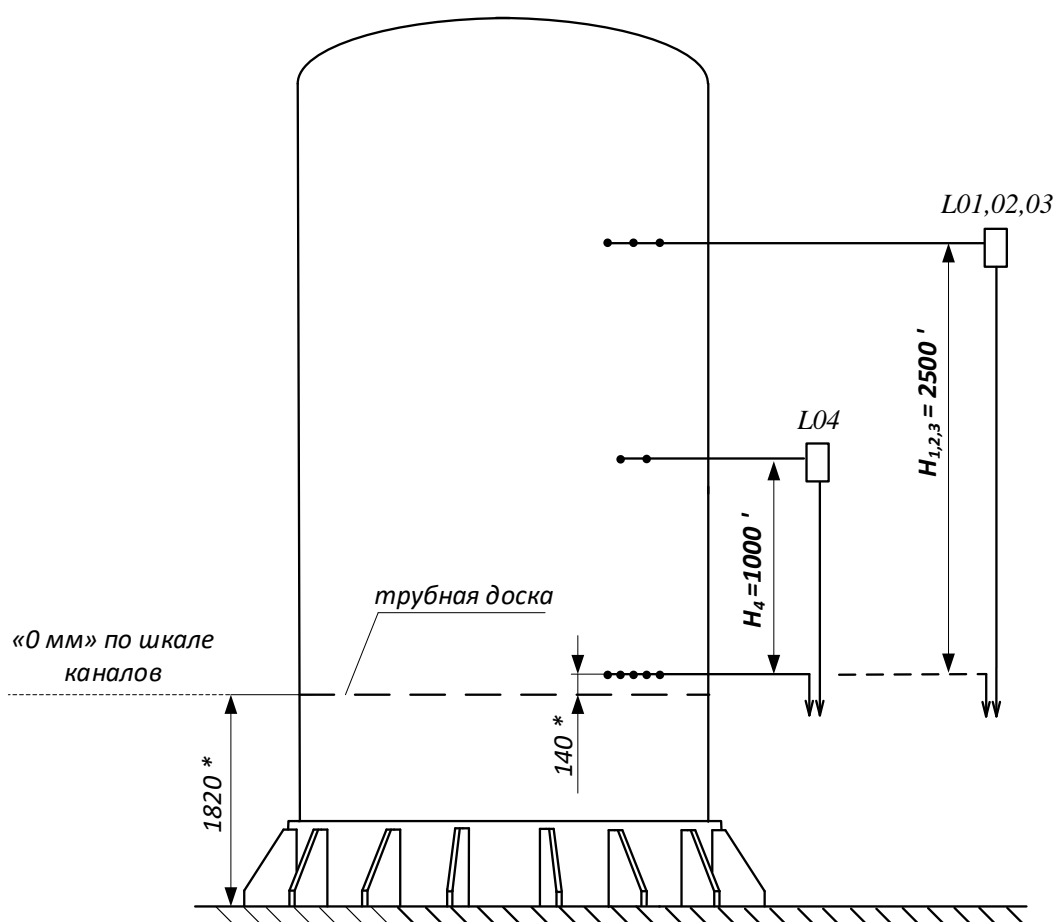
Измерения уровня выполняются четырьмя датчиками разности давлений (L01-L04), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА.

Номинальное значение абсолютного давления в ПСВ-3 составляет 0,687 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе ПСВ-3 на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в ПСВ-3 и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров L01-L04 представлены на эскизе ПСВ-3 (рис. 38). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемеров принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

* - размеры согласно конструкторской документации

' - усредненные результаты геодезических измерений

Рисунок 38 – ПСВ-3

Задача № 18. Рассчитать:

- «холодную» шкалу для четырех ИК уровня (L01-L04) в конденсаторе турбинной установки с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «холодной» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

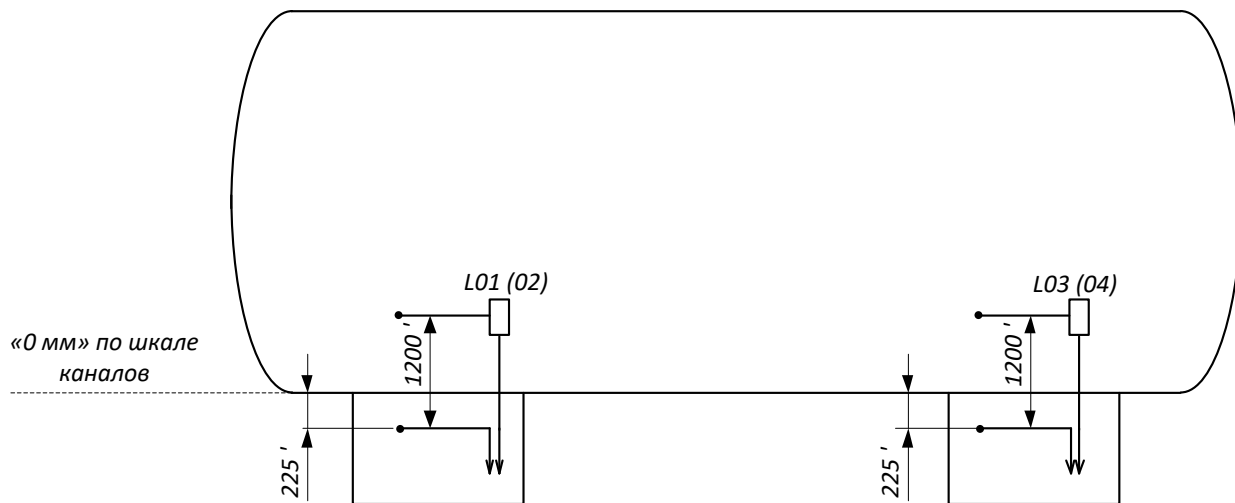
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются четырьмя датчиками разности давлений (L01-L04), каждый из которых имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в конденсаторе турбинной установки составляет 5 кПа (рабочая среда вода в состоянии насыщения, плотностью пара пренебречь). Плотность среды в импульсных линиях для условия «холодной» шкалы считать равной плотности среды в конденсаторе.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемеров L01-L04 представлены на эскизе конденсатора турбинной установки (рис. 39). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемеров принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчиков выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

' - усредненное значение результатов геодезических измерений

Рисунок 39 – Конденсатор турбинной установки

Задача № 19. *Рассчитать:*

- «холодную» шкалу для ИК уровня в маслобаке с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «холодной» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

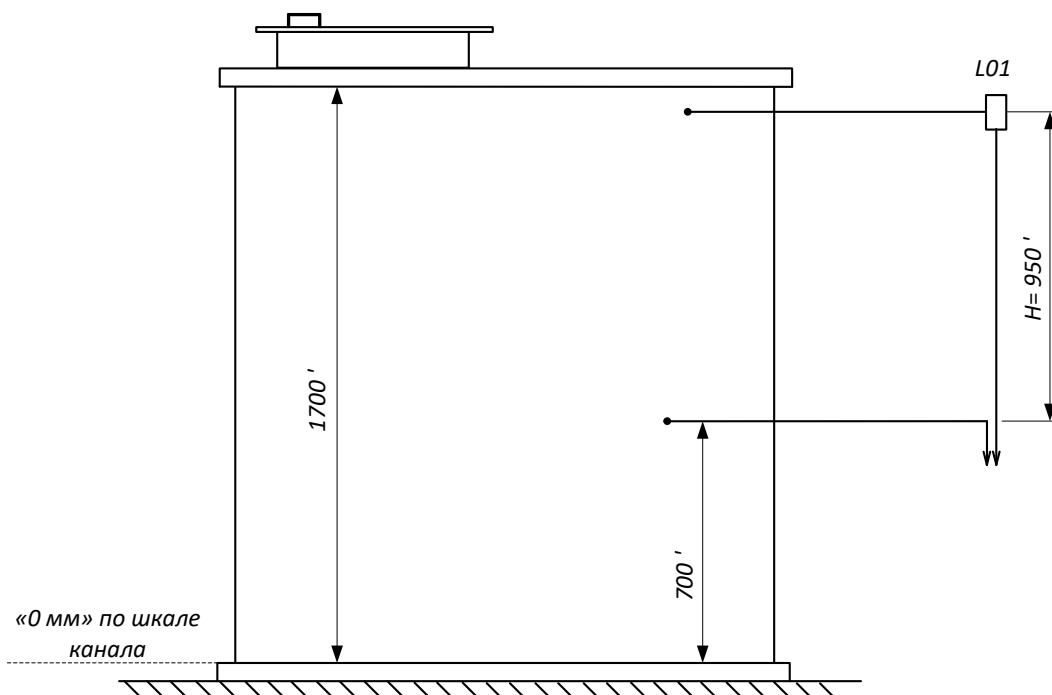
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются датчиком разности давлений, который имеет убывающую выходную линейную токовую характеристику 20-4 мА. Плотность масла в баке и импульсных линиях принять равной 1100 кг/м^3 .

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемера представлены на эскизе маслобака (рис. 40). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемера принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчика выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

' - значение результатов геодезии

Задача № 20. *Рассчитать:*

- «холодную» шкалу для ИК уровня в расширителе продувки с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

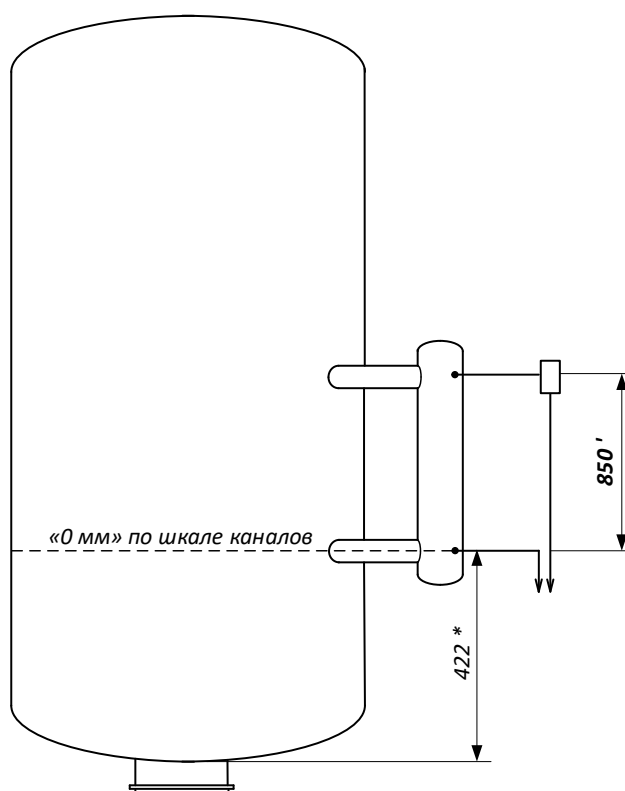
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются датчиком разности давлений, который имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение температуры в расширителе дренажей составляет 177 °С (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе расширителя продувки на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в расширителе продувки и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемера представлены на эскизе расширителя продувки (рис. 41). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемера принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчика выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



' - усредненное значение результатов геодезии

** - размеры согласно конструкторской документации*

Рисунок 41 – Расширитель продувки

Задача № 21. *Рассчитать:*

- «холодную» шкалу для ИК уровня в подогревателе конденсата с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

Исходные данные.

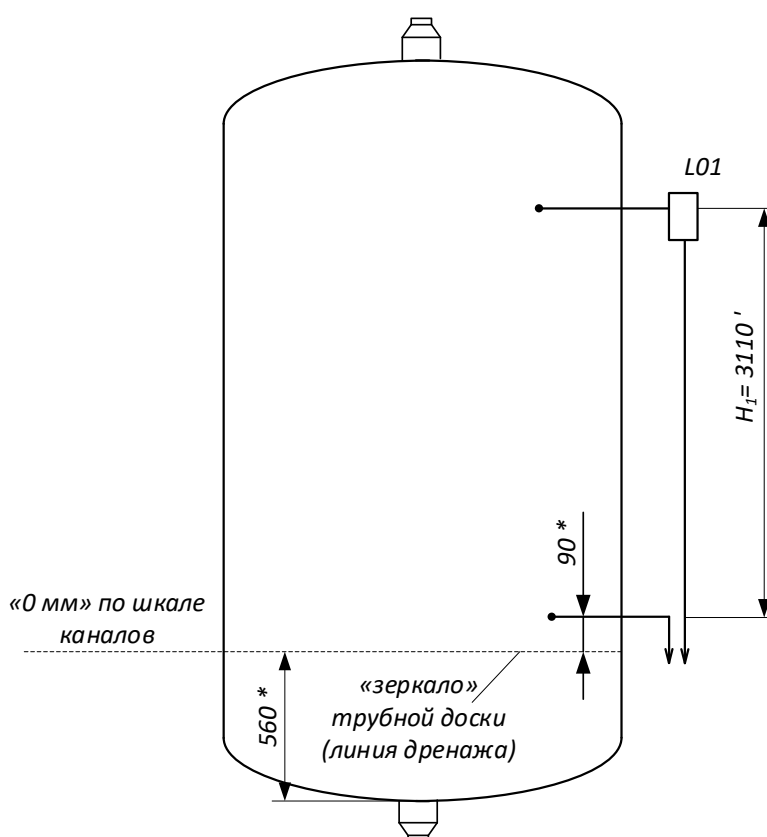
Измерения уровня выполняются датчиком разности давлений, который имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение абсолютного давления в подогревателе конденсата составляет 0,78 МПа (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности

импульсных линий при работе подогревателя конденсата на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в подогревателе конденсата и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемера представлены на эскизе подогревателя конденсата (рис. 41). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемера принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчика выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

' - усредненное значение результатов геодезии

* - Размеры согласно конструкторской документации

Рисунок 42 – Подогреватель конденсата

Задача № 22. Рассчитать:

- «холодную» шкалу для ИК уровня в аппарате выпарном с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,

- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

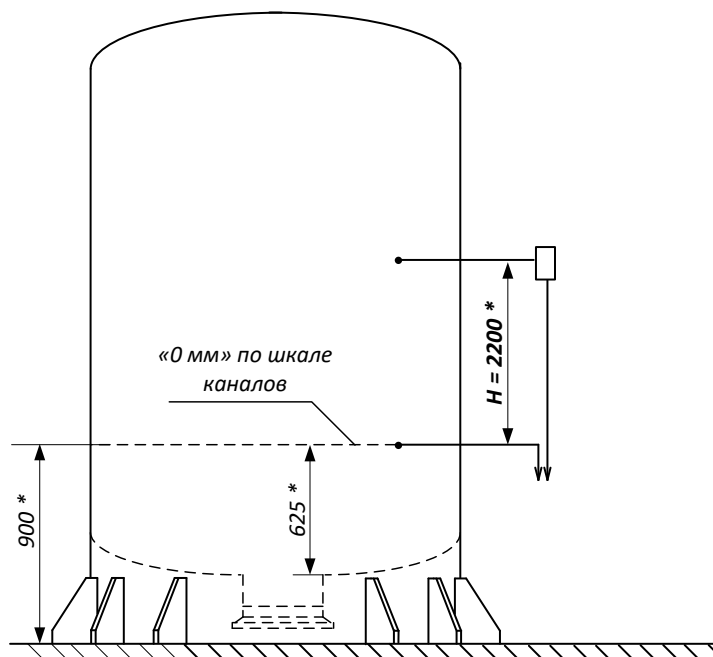
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются датчиком разности давлений, который имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение температуры в аппарате выпарном составляет 102,8 °С (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе аппарата выпарного на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в аппарате выпарном и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемера представлены на эскизе аппарата выпарного (рис. 43). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемера принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчика выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

* - размеры согласно конструкторской документации

Рисунок 43 – Аппарат выпарной

Задача № 23. Рассчитать:

- «холодную» шкалу для ИК уровня в доупаривателе с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

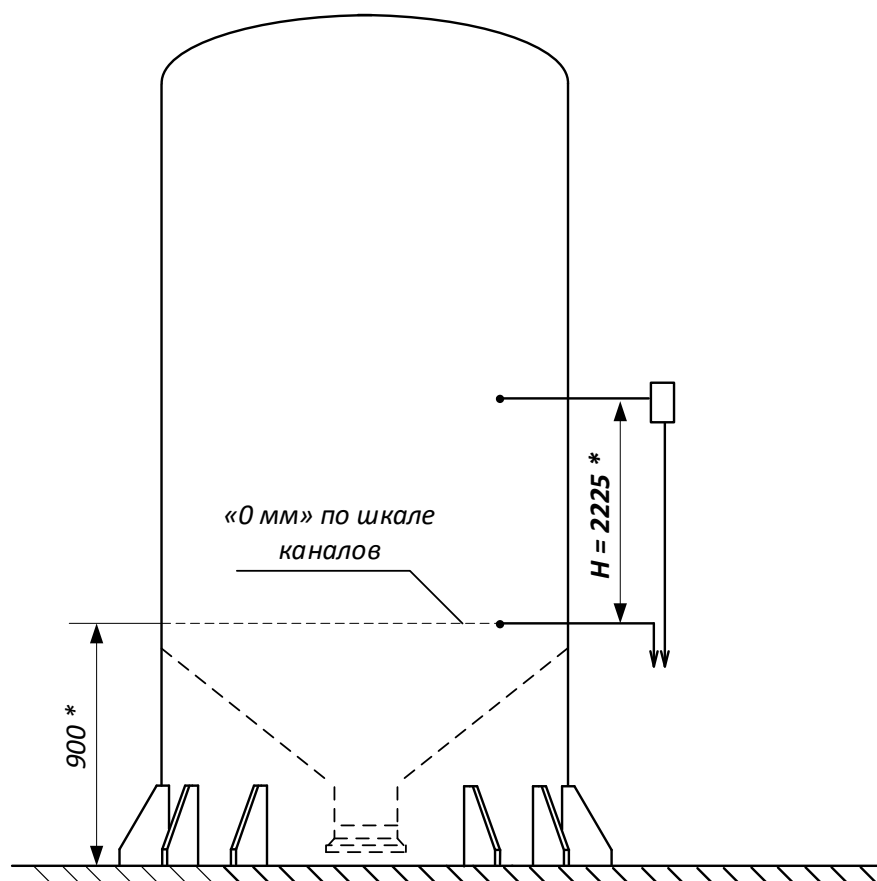
Исходные данные.

Измерения уровня выполняются датчиком разности давлений, который имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение температуры в доупаривателе составляет 106,5 °С (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе доупаривателя на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в доупаривателе и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемера представлены на эскизе доупаривателя (рис. 44). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемера принять по отметке, указанной на эскизе.

Шкалу измерений датчика выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.



Примечание:

* - размеры согласно конструкторской документации

Рисунок 44 – Доупариватель

Задача № 24. Рассчитать:

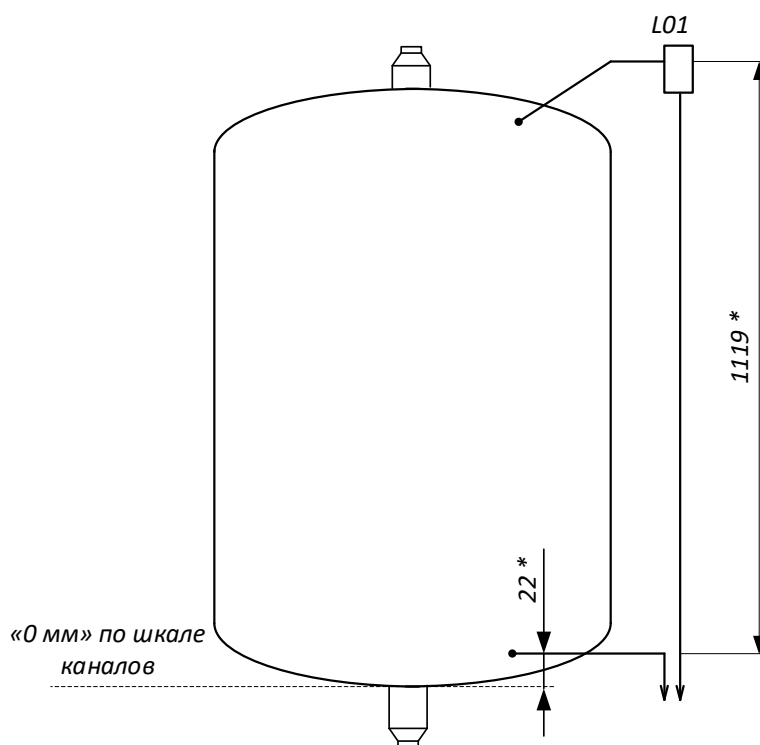
- «холодную» шкалу для ИК уровня в баке выпарных аппаратов с учетом коррекции показаний на фактические базы уровнемеров,
- максимальный и минимальный перепад давления на датчиках по «горячей» шкале при номинальной плотности рабочей среды,
- поправочные коэффициенты K и B на «горячую» шкалу для номинального значения плотности рабочей среды,
- градуировочные характеристики ИК уровня по «холодной» и «горячей» шкале (градуировочные характеристики должны быть представлены в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

Исходные данные.

Измерения уровня выполняются датчиком разности давлений, который имеет убывающую линейную токовую характеристику 20-4 мА. Номинальное значение температуры в баке выпарных аппаратов составляет 110 °С (рабочая среда двухфазная «вода-пар» в состоянии насыщения). Средняя температура поверхности импульсных линий при работе бака выпарных аппаратов на номинальных параметрах составляет 25 °С. Условия «холодной» шкалы: температура среды в баке выпарных аппаратов и импульсных линиях 25 °С, давление 1 атм.

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты геодезической съемки фактической базы уровнемера представлены на эскизе бака выпарных аппаратов (рис. 43). Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемера принять по отметке, указанной на эскизе.



Примечание:

* - размеры согласно конструкторской документации

Рисунок 45 – Бак выпарных аппаратов

Задача № 25*. Рассчитать:

— шкалу измерительного канала с погружным гидростатическим уровнемером зондового типа, включая: шкалу измерений датчика (в кПа), шкалу измерений АЦП ПТК (в мм), шкалу измерений СВУ

— градуировочную характеристику ИК уровня (градуировочная характеристика должна быть представлена в табличном виде с шагом по выходному токовому сигналу датчика 2 мА).

Исходные данные.

Измерения уровня выполняются погружным гидростатическим уровнемером, который имеет возрастающую линейную токовую характеристику 4-20 мА. Зонд погружен в воду, которая находится под атмосферным давлением и имеет температуру 15 °С

Местное ускорение свободного падения $g = 9,819 \text{ м/с}^2$.

Результаты измерений длины троса и геодезической съемки расположения датчика представлены на рис. 46. Нулевое значение «0 мм» по показаниям уровнемера принять по отметке, указанной на эскизе. Шкалу измерений датчика выбрать из стандартного ряда значений ГОСТ 22520.

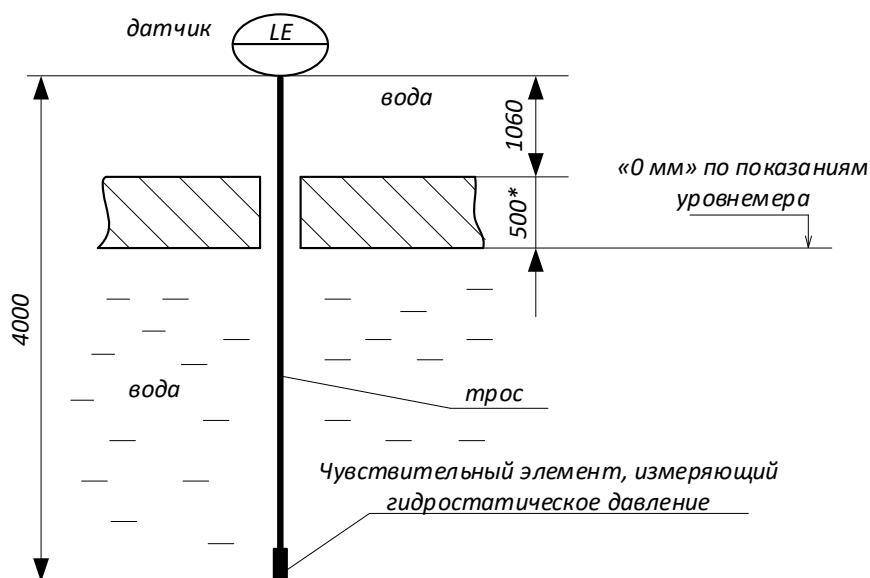


Рисунок 46 – Размещение гидростатического уровнемера с погружным зондом

4.3 Ответы к задачам

Ответы к задаче № 3.

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L01, L02:

- максимальный перепад на датчике 24,473 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 25 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК от 0,226 до 2,78 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,28 до 2,78 м.

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L03(04,05):

- максимальный перепад на датчике 39,158 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 40 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,194 до 4,28 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,28 до 4,28 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной» шкале ИК L01(02)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	226	545	865	1184	1503	1822	2142	2461	2780

ИК L03(04,05)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	40	35	30	25	20	15	10	5	0
$L, \text{мм}$	194	705	1216	1726	2237	2748	3259	3769	4280

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01(02):

- максимальный перепад на датчике 24,266 кПа;
- минимальный перепад на датчике 3,551 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,181445531$; $B = -75,77124522$

мм.

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L03(04,05):

- максимальный перепад на датчике 38,827 кПа;
- минимальный перепад на датчике 5,582 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,181445531$; $B = -90,7511431$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале.

L01(02)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	192	569	946	1323	1700	2077	2454	2832	3209

L03(04,05)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	40	35	30	25	20	15	10	5	0
$L, \text{мм}$	138	742	1345	1949	2552	3156	3759	4362	4966

Ответы к задаче № 4.

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L01(-03):

- максимальный перепад на датчике 24,473 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 25 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК от 0,016 до 2,57 м;
- диапазон измерений СВУ от 0,07 до 2,57 м.

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 15,663 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,036 до 1,67 м;
- диапазон измерений СВУ от 0,07 до 1,67 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной» шкале

ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	16	335	655	974	1293	1612	1932	2251	2570

ИК L04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	36	240	444	649	853	1057	1261	1466	1670

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 24,45 кПа;
- минимальный перепад на датчике 1,042 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,048738334$; $B = -5,671503859$

мм.

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 15,65 кПа;
- минимальный перепад на датчике 0,714 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,048738334$; $B = -4,857968494$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	11	346	681	1016	1350	1685	2020	2355	2690

ИК CL04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	32	247	461	675	890	1104	1318	1532	1747

Ответы к задаче № 5.

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 24,473 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 25 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,016 до 2,57 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,07 до 2,57 м.

Результаты расчетов по «холодной» ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 15,663 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК от 0,036 до 1,67 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,07 до 1,67 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной»

L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	16	335	655	974	1293	1612	1932	2251	2570

L04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	36	240	444	649	853	1057	1261	1466	1670

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 24,406 кПа;
- минимальный перепад на датчике 2,084 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,096403251$; $B = -14,33185258$

мм.

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 15,619 кПа;
- минимальный перепад на датчике 1,334 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,096403251$; $B = -11,60174757$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале

ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	3	353	703	1053	1403	1753	2103	2453	2803

ИК L04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	27	251	475	699	923	1147	1371	1595	1819

Ответы к задаче № 6.

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 6,167 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 6,3 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 0,214 до плюс 0,43 м;
- диапазон измерений СВБУ, ТС ОДУ..... от минус 0,2 до плюс 0,43 м.

Результаты расчетов по «холодной» ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 9,79 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 10 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 2,215 до 3,236 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 2,236 до 3,236 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной»
шкале

ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	6,3	5,5125	4,725	3,9375	3,15	2,3625	1,575	0,7875	0
$L, \text{мм}$	-214	-133	-53	28	108	189	269	350	430

ИК L04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	10	8,75	7,5	6,25	5	3,75	2,5	1,25	0
$L, \text{мм}$	2215	2342	2470	2598	2725	2853	2981	3108	3236

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 6,149 кПа;
- минимальный перепад на датчике 0,54 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,099592644$; $B = 17,8860344$

мм.

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 6,155 кПа;
- минимальный перепад на датчике 0,434 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,099592644$; $B = -225,9153333$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале
ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	6,3	5,5125	4,725	3,9375	3,15	2,3625	1,575	0,7875	0
$L, \text{мм}$	-217	-128	-40	48	137	225	314	402	491

ИК L04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	10	8,75	7,5	6,25	5	3,75	2,5	1,25	0
$L, \text{мм}$	2209	2350	2490	2630	2771	2911	3052	3192	3332

Ответы к задаче № 7.

Результаты расчетов «холодной» шкалы ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 15,272 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,038 до 1,672 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,112 до 1,672 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной»
шкале

шкала ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	38	242	446	651	855	1059	1263	1468	1672

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК 10LCS51CL001(002,003):

- максимальный перепад на датчике 15,08 кПа;
- минимальный перепад на датчике 2,587 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,222446864$; $B = - 48,83047042$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале
ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	-3	247	497	746	996	1246	1496	1745	1995

Ответы к задаче № 8.

Результаты расчетов «холодной» шкалы ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 15,585 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,07 до 1,704 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,112 до 1,704 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной»
шкале
L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	70	274	478	683	887	1091	1295	1500	1704

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 15,39 кПа;
- минимальный перепад на датчике 2,64 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,222446864$; $B = -49,32106368$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале
ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	36	286	535	785	1035	1284	1534	1784	2034

Ответы к задаче № 9

Результаты расчетов «холодной» шкалы ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 15,614 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,098 до 1,732 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,137 до 1,732 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной» шкале

ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	98	302	506	711	915	1119	1323	1528	1732

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 15,126 кПа;
- минимальный перепад на датчике 3,95 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,397229125$; $B = -124,1206219$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	12	298	583	869	1154	1440	1725	2010	2296

Ответы к задаче № 10

Результаты расчетов «холодной» шкалы ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 15,96 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,133 до 1,767 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,137 до 1,767 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной» шкале
ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	133	337	541	746	950	1154	1358	1563	1767

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 15,457 кПа;
- минимальный перепад на датчике 4,037 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,397229125$; $B = -125,6500941$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале
ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	60	345	631	916	1201	1487	1772	2058	2343

Ответы к задаче № 11

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L01(02):

- максимальный перепад на датчике 12,53 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 0,115 до плюс 1,519 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,239 до 1,519 м.

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L03(04,05):

- максимальный перепад на датчике 12,433 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 0,364 до плюс 1,27 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0 до 1,27 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной»

шкале

ИК L01(02)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	-115	89	293	498	702	906	1110	1315	1519

ИК L03(04,05)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	-364	-160	44	249	453	657	861	1066	1270

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01(02):

- максимальный перепад на датчике 12,494 кПа;
- минимальный перепад на датчике 1,098 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,099592644$; $B = -27,93215427$

мм.

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L03(04,05):

- максимальный перепад на датчике 12,396 кПа;
- минимальный перепад на датчике 1,09 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,099592644$; $B = -4,097250571$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале

ИК L01(02)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	-155	70	294	519	744	968	1193	1418	1642

ИК L03(04,05)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	-405	-180	45	269	494	718	943	1168	1392

Ответы к задаче № 12

Результаты расчетов по «холодной» шкале:

- максимальный перепад на датчике 8,321 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 10 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 0,171 до плюс 0,85 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0 до 0,85 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной» шкале

ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	10	8,75	7,5	6,25	5	3,75	2,5	1,25	0
$L, \text{мм}$	-171	-44	84	212	339	467	595	722	850

Результаты расчетов по «горячей» шкале:

- максимальный перепад на датчике 8,297 кПа;
- минимальный перепад на датчике 0,729 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,099592644$; $B = -2,742254319$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале
шкала ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	10	8,75	7,5	6,25	5	3,75	2,5	1,25	0
$L, \text{мм}$	-191	-51	89	230	370	511	651	792	932

Ответы к задаче № 13

Результаты расчетов по «холодной» шкале:

- максимальный перепад на датчике 15,663 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,966 до 2,6 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 1 до 2,6 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной» шкале
ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	966	1170	1374	1579	1783	1987	2191	2396	2600

Результаты расчетов по «горячей» шкале:

- максимальный перепад на датчике 15,617 кПа;
- минимальный перепад на датчике 1,373 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,099592644$; $B = -104,7545344$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале
ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	957	1182	1406	1631	1856	2080	2305	2530	2754

Ответы к задаче № 14

Результаты расчетов по «холодной» шкале:

- максимальный перепад на датчике 24,473 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 25 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 0,276 до плюс 2,278 м;
- диапазон измерений СВУ от минус 0,222 до плюс 2,278 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной» шкале
ИК L001

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	-276	43	363	682	1001	1320	1640	1959	2278

Результаты расчетов по «горячей» шкале:

- максимальный перепад на датчике 23,676 кПа;
- минимальный перепад на датчике 6,304 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,408845143$; $B = -24,08769332$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале

ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	-413	37	487	937	1386	1836	2286	2736	3185

Ответы к задаче № 15

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 39,158 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 40 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,054 до 4,14 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,14 до 4,14 м.

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 21,83 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 25 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 0,184 до плюс 2,37 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,14 до 2,37 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной»

шкале

ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	40	35	30	25	20	15	10	5	0
$L, \text{мм}$	54	565	1076	1586	2097	2608	3119	3629	4140

ИК L04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	-184	135	455	774	1093	1412	1732	2051	2370

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 39,128 кПа;
- минимальный перепад на датчике 1,66 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,045119515$; $B = -9,565167983$

мм.

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 21,814 кПа;
- минимальный перепад на датчике 0,926 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,045119515$; $B = -8,127735119$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале

ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	40	35	30	25	20	15	10	5	0
$L, \text{мм}$	47	581	1114	1648	2182	2716	3250	3783	4317

ИК L04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	-200	133	467	801	1134	1468	1802	2135	2469

Ответы к задаче № 16

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 24,473 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 25 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,086 до 2,64 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,14 до 2,64 м.

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 9,79 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 10 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,119 до 1,14 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,14 до 1,14 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной»

шкале

ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	86	405	725	1044	1363	1682	2002	2321	2640

ИК L04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	10	8,75	7,5	6,25	5	3,75	2,5	1,25	0
$L, \text{мм}$	119	246	374	502	629	757	885	1012	1140

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 24,415 кПа;
- минимальный перепад на датчике 1,954 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,089623321$; $B = -19,0625275$

мм.

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 9,766 кПа;
- минимальный перепад на датчике 0,781 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,089623321$; $B = -15,15336996$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале

ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	75	423	771	1118	1466	1814	2162	2510	2858

ИК L04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	10	8,75	7,5	6,25	5	3,75	2,5	1,25	0
$L, \text{мм}$	114	253	392	531	670	810	949	1088	1227

Ответы к задаче № 17

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 24,473 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 25 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,086 до 2,64 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,14 до 2,64 м.

Результаты расчетов по «холодной» шкале ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 9,79 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 10 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,119 до 1,14 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,14 до 1,14 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной»

шкале

ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	86	405	725	1044	1363	1682	2002	2321	2640

ИК L04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	10	8,75	7,5	6,25	5	3,75	2,5	1,25	0
$L, \text{мм}$	119	246	374	502	629	757	885	1012	1140

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01(02,03):

- максимальный перепад на датчике 24,39 кПа;
- минимальный перепад на датчике 2,31 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,108157129$; $B = -24,59008431$

мм.

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L04:

- максимальный перепад на датчике 9,756 кПа;
- минимальный перепад на датчике 0,922 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,108157129$; $B = -18,92123253$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале ИК L01(02,03)

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	71	425	778	1132	1486	1840	2193	2547	2901

ИК L04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	10	8,75	7,5	6,25	5	3,75	2,5	1,25	0
$L, \text{мм}$	112	254	395	537	678	820	961	1103	1244

Ответы к задаче № 18

Результаты расчетов по «холодной» шкале:

- максимальный перепад на датчике 11,72 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 664 до плюс 975 мм;
- диапазон измерений СВУ..... от минус 225 до плюс 975 мм.

Результаты расчета градуировочной характеристики ИК уровня по «холодной» шкале

ИК L01-04

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	-664	-459	-254	-49	156	361	565	770	975

Ответы к задаче № 19

Результаты расчетов по «холодной» шкале:

- максимальный перепад на датчике 10,26 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от 0,169 до 1,65 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0,7 до 1,65 м.

Результаты расчета градуировочной характеристики ИК уровня по «холодной»

шкале

ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	169	354	539	724	909	1094	1280	1465	1650

Ответы к задаче № 20

Результаты расчетов по «холодной» шкале:

- максимальный перепад на датчике 8,321 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 10 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 0,171 до плюс 0,85 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0 до 0,85 м.

Результаты расчета градуировочной характеристики ИК уровня по «холодной»

шкале

ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	10	8,75	7,5	6,25	5	3,75	2,5	1,25	0
$L, \text{мм}$	-171	-44	84	212	339	467	595	722	850

Результаты расчетов по «горячей» шкале:

- максимальный перепад на датчике 8,283 кПа;
- минимальный перепад на датчике 0,894 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,126137276$; $B = -4,340005495$

мм.

Результаты расчета градуировочной характеристики ИК уровня по «горячей» шкале
ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	10	8,75	7,5	6,25	5	3,75	2,5	1,25	0
$L, \text{мм}$	-197	-54	90	234	378	521	665	809	953

Ответы к задаче № 21

Результаты расчетов по «холодной» шкале:

- максимальный перепад на датчике 30,445 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 40 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 0,886 до плюс 3,2 м;
- диапазон измерений СВУ от 0,09 до 3,2 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной» шкале
ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	40	35	30	25	20	15	10	5	0
$L, \text{мм}$	-886	-375	136	646	1157	1668	2179	2689	3200

Результаты расчетов по «горячей» шкале ИК L01:

- максимальный перепад на датчике 30,329 кПа;
- минимальный перепад на датчике 3,029 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,115203898$; $B = -23,63840521$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале
ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	40	35	30	25	20	15	10	5	0
$L, \text{мм}$	-1012	-442	127	697	1267	1836	2406	2975	3545

Ответы к задаче № 22

Результаты расчетов по «холодной» шкале:

- максимальный перепад на датчике 21,537 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 25 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 0,354 до плюс 2,2 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0 до 2,2 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной» шкале

ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	-354	-35	285	604	923	1242	1562	1881	2200

Результаты расчетов по «горячей» шкале:

- максимальный перепад на датчике 21,521 кПа;
- минимальный перепад на датчике 0,877 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,043218802$; $B = -1,672605852$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале

ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	-371	-38	295	628	961	1294	1627	1960	2293

Ответы к задаче № 23

Результаты расчетов по «холодной» шкале:

- максимальный перепад на датчике 21,782 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 25 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК..... возрастающая (от 4 до 20 мА);
- выходная шкала АЦП ПТК..... от минус 0,329 до плюс 2,225 м;
- диапазон измерений СВУ..... от 0 до 2,225 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной» шкале

ИК L02

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	-329	-10	310	629	948	1267	1587	1906	2225

Результаты расчетов по «горячей» шкале:

- максимальный перепад на датчике 21,764 кПа;
- минимальный перепад на датчике 0,948 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,04636568$; $B = -1,875232794$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале

ИК L02

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	25	21,875	18,75	15,625	12,5	9,375	6,25	3,125	0
$L, \text{мм}$	-346	-12	322	656	990	1324	1658	1992	2326

Ответы к задаче № 24

Результаты расчетов по «холодной» шкале:

- максимальный перепад на датчике 10,954 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 16 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК от 4 до 20 мА;
- выходная шкала АЦП ПТК от минус 0,493 до плюс 1,141 м;
- диапазон измерений СВУ от 0,022 до 1,141 м.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «холодной»

шкале

ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	-493	-289	-85	120	324	528	732	937	1141

Результаты расчетов по «горячей» шкале:

- максимальный перепад на датчике 505,65 кПа;
- минимальный перепад на датчике 0,506 кПа;
- поправочные коэффициенты: $K = 1,04935764$; $B = -2,115424844$

мм.

Результаты расчета градуировочных характеристик ИК уровня по «горячей» шкале

ИК L01

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$L, \text{мм}$	-520	-305	-91	123	338	552	766	981	1195

Ответы к задаче № 25*

Подсказка.

Высотная отметка погружения зонда рассчитывается по формуле:

$$h = S - (H - h_0 - h_{\text{пл.}})$$

где $S = 0$ (нулевая отметка по показаниям уровнемера), H - общая длина троса с погружным зондом, h_0 – высота датчика над плитой, $h_{\text{пл.}}$ – толщина плиты.

Ответы.

- максимальное гидростатическое давление на датчике (до отметки «0 мм»)..... 23,95 кПа;
- диапазон измерений датчика от 0 до 25 кПа;
- входная шкала АЦП ПТК от 4 до 20 мА;
- выходная шкала АЦП ПТК от минус 2,44 м до плюс 0,107 м;
- диапазон измерений СВУ..... от минус 2,44 до 0,107 м.

Результаты расчета градуировочной характеристики ИК уровня

$I_{\text{вых}}, \text{мА}$	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\Delta P, \text{кПа}$	0	3,13	6,25	9,38	12,5	15,625	18,75	21,875	25
$L, \text{м}$	-2,44	-2,122	-1,803	-1,485	-1,167	-0,848	-0,53	-0,212	0,107