

ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАСХОДОМЕТРИИ –
ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИТАРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ «ВСЕ-
РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
им. Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА»
ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

по развитию ВНИИР – филиала

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

А.С. Тайбинский




Государственная система обеспечения единства измерений

СЧЕТЧИКИ ЖИДКОСТИ ТУРБИННЫЕ РТФ, РНФ

Методика поверки

МП 1141-9-2020

Начальник НИО-9


К.А. Левин
Тел.: (843) 272-01-91

Казань
2020

РАЗРАБОТАНА ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

ИСПОЛНИТЕЛИ В.В. Гетман

УТВЕРЖДЕНА ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Настоящая инструкция распространяется на счетчики жидкости турбинные РТФ, РNF (далее – счетчики) и устанавливает методику первичной поверки при вводе в эксплуатацию, а также после ремонта и периодической поверки при эксплуатации.

Поверку счетчиков проводят в диапазоне измерений, указанном в описании типа, или фактически обеспечиваемом при поверке диапазоне измерений, не превышающем значений, указанных в описании типа, в рабочем диапазоне вязкости, в соответствии с заявкой на поверку, с обязательным указанием в свидетельстве о поверке информации об объеме проведенной поверки.

Интервал между поверками счетчиков – 1 год.

1 Операции поверки

1.1 При проведении поверки выполняют операции, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Операции поверки

| Наименование операции | Номер пункта инструкции | Проведение операции при | |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| | | первичной поверке | периодической поверке |
| Внешний осмотр | 6.1 | Да | Да |
| Опробование | 6.2 | Да | Да |
| Определение метрологических характеристик (МХ) счетчиков | 6.3 | Да | Да |

2 Средства поверки

2.1 Основные средства поверки:

- рабочий эталон 1 или 2 разряда в соответствии с поверочной схемой «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений массы и объема жидкости в потоке, объема жидкости и вместимости при статических измерениях, массового и объемного расходов жидкости», Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 февраля 2018 г. № 256.

Допускается применение аналогичных средств поверки, обеспечивающих определение метрологических характеристик поверяемых средств измерений с требуемой точностью.

2.2 Дополнительные средства поверки

При проведении поверки применяют средства поверки, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Дополнительные средства поверки и их метрологические характеристики

| Средства поверки | Метрологические характеристики |
|--|---|
| Поточный преобразователь плотности (далее – ПП) | Пределы допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,3 \text{ кг/м}^3$ |
| Преобразователи избыточного давления с унифицированным выходным сигналом | Пределы допускаемой приведенной погрешности $\pm 0,5 \%$ |
| Термопреобразователи сопротивления с унифицированным выходным сигналом | Пределы допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Манометры | Класс точности 0,6 |
| Термометры ртутные стеклянные | Пределы допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ |

Продолжение таблицы 2

| | |
|--|--|
| Преобразователи вязкости | Пределы допускаемой приведенной погрешности $\pm 1,0$ % |
| Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) | Пределы допускаемой относительной погрешности преобразования входных электрических сигналов в значение коэффициента преобразования $\pm 0,025$ % |

Все средства поверки должны иметь действующие свидетельства о поверке или знаки поверки.

Допускается применять другие средства поверки, по своим характеристикам не уступающим, указанным в пп. 2.1, 2.2.

3 Требования безопасности

3.1 При проведении поверки соблюдают требования безопасности, определяемые следующими документами:

- Трудовой Кодекс Российской Федерации;
- ПБ 08-624-03 «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности»;
- «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей» (утверждены приказом № 6 Минэнерго РФ от 13.01.03 г.);
- ПОТ Р М-016-2001, РД 153-34.0-03.150-00 (с изм. 2003) «Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок»;
- «Правила устройства электроустановок (ПУЭ) потребителей» (6-е изд., 7-е изд.);
- правила безопасности при эксплуатации средств поверки, приведенные в эксплуатационной документации;
- инструкции по охране труда, действующие на объекте.

3.2 Наибольшее давление поверочной жидкости при проведении поверки не должно превышать значения, указанного в эксплуатационной документации на оборудование и применяемые средства измерений. Использование элементов монтажа или шлангов, не прошедших гидравлические испытания, запрещается.

3.3 На трубопроводах, заполненных поверочной жидкостью, применяют приборы взрывозащищенного исполнения, на которых нанесены четкие надписи и маркировка, подтверждающие безопасность их применения.

3.4 К средствам поверки и используемому при поверке оборудованию обеспечивают свободный доступ. При необходимости предусматривают лестницы и площадки, соответствующие требованиям безопасности.

3.5 Освещенность в условиях эксплуатации СРМ соответствует санитарным нормам согласно СНиП 23-05-95.

3.6 Управление оборудованием и средствами поверки производят лица, прошедшие обучение и проверку знаний требований безопасности и допущенные к обслуживанию счетчиков.

3.7 При появлении течи поверочной жидкости, загазованности и других ситуаций, нарушающих процесс поверки, поверка должна быть прекращена.

4 Условия поверки

4.1 При проведении поверки счетчиков соблюдают следующие условия:

4.1.1 Поверку проводят на месте эксплуатации в составе измерительной системы

в комплекте с элементами измерительных линий либо в составе испытательных, поверочных и калибровочных комплексов, использующих жидкости – заменители рабочих сред.

4.1.2 Диапазон объемного расхода поверочной жидкости через поверяемый счетчик должен соответствовать расходу, указанному владельцем счетчика в письменной заявке, и не выходить за пределы диапазона измерений, указанного в описании типа счетчика.

4.1.3 Отклонение объемного расхода поверочной жидкости от установленного значения в процессе поверки не должно превышать 2,5 %.

4.1.4 Изменение температуры поверочной жидкости в поверочной установке и поверяемом счетчике за время одного измерения не должно превышать 0,2 °С.

4.1.5 Диапазоны рабочего давления и объемного расхода определяются типоразмером поверяемого счетчика, рабочим диапазоном объемного расхода средств поверки и технологическими требованиями.

4.1.6 Температура, влажность окружающей среды и физико-химические показатели поверочной жидкости должны соответствовать условиям эксплуатации счетчика.

4.1.7 При использовании в качестве поверочной жидкости нефти или нефтепродуктов объемная доля воды не должна превышать 5 %.

4.1.8 Содержание свободного газа не допускается.

4.1.9 Для обеспечения бескавитационной работы избыточное давление в трубопроводе после ПР P_{min} , МПа, должно быть не менее вычисленного по формуле

$$P_{min} = 2,06 \cdot P_{НП} + 2 \cdot \Delta P \quad (1)$$

где $P_{НП}$ - давление насыщенных паров, определенное в соответствии с ГОСТ 1756 при максимально возможной температуре поверочной жидкости, МПа;

ΔP - перепад давления на ПР, указанный в технической документации, МПа.

4.2 Регулирование объемного расхода проводят при помощи регулятора расхода, расположенного на выходе поверочной установки (ПУ) и (или) на измерительных линиях. Допускается вместо регулятора расхода использовать запорную арматуру.

5 Подготовка к поверке

5.1 Проверяют наличие действующих свидетельств о поверке или знаков поверки на все средства поверки.

5.2 Если в комплект поверяемого счетчика входит прибор вторичный теплоэнергоконтроллер ИМ2300 или другой измерительно-вычислительный комплекс, счетчик импульсов, средство обработки информации (далее – ПВ), то выполняют его поверку в соответствии с нормативным документом на поверку.

5.3 Проверяют правильность монтажа средств поверки и поверяемого счетчика. Если в состав счетчика входит ПВ, то отсоединяют ПВ от преобразователя объема и объемного расхода турбинного (далее – ПР) и подключают ПР к ИВК (средству поверки).

5.4 Подготавливают средства поверки согласно указаниям технической документации.

5.5 Вводят в память ИВК или проверяют введенные ранее данные, необходимые для обработки результатов поверки.

5.6 Проверяют отсутствие газа в измерительной линии с поверяемым счетчиком и

ПУ, а также в верхних точках трубопроводов. Для этого устанавливают объемный расход поверочной жидкости в пределах диапазона измерений поверяемого счетчика и приоткрывают краны, расположенные в высших точках измерительной линии и ПУ. Проводят 1-3 раза запуск поршня, удаляя после каждого запуска газ. Считают, что газ (воздух) отсутствует полностью, если из кранов вытекает струя поверочной жидкости без газовых пузырьков.

5.7 При рабочем давлении проверяют герметичность системы, состоящей из поверяемого счетчика и ПУ. При этом не допускается появление капель или утечек поверочной жидкости через сальники, фланцевые, резьбовые или сварные соединения при наблюдении в течение 5 мин.

5.8 Проверяют герметичность задвижек, через которые возможны утечки поверочной жидкости, влияющие на результаты измерений при поверке.

5.9 Проверяют герметичность устройства пуска и приема поршня ПУ в соответствии с технической документацией.

5.10 Проверяют стабильность температуры поверочной жидкости. Температуру поверочной жидкости считают стабильной, если ее изменение в ПУ и в поверяемом счетчике не превышает 0,2 °С за время измерения.

5.11 Определяют плотность поверочной жидкости за время поверки одним из следующих методов:

- с помощью поточного плотномера;
- в испытательной лаборатории либо расчетным методом по аттестованной методике (методу) выполнения измерений. Для нефти и нефтепродуктов – по ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. методы определения плотности (с Изменением № 1, с Поправкой) с учетом Рекомендации по метрологии Р 50.2.076 «ГСИ. Плотность нефти и нефтепродуктов. Методы расчета. программы и таблицы приведения».

5.12 Определяют кинематическую вязкость поверочной жидкости за время поверки одним из следующих методов:

- с помощью поточного вискозиметра;
- в испытательной лаборатории либо расчетным методом по аттестованной методике (методу) выполнения измерений. Для нефти и нефтепродуктов – по ГОСТ 33-2016 «Нефть и нефтепродукты. прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости».

6 Проведение поверки

6.1 Внешний осмотр

При внешнем осмотре устанавливают соответствие поверяемого счетчика следующим требованиям:

- комплектность соответствует указанной в технической документации;
- отсутствуют механические повреждения и дефекты, препятствующие применению;
- надписи и обозначения на поверяемом счетчике четкие и соответствуют требованиям технической документации.

6.2 Опробование

6.2.1 Опробование поверяемого счетчика проводят совместно со средствами поверки.

6.2.2 Устанавливают объемный расход поверочной жидкости в пределах рабочего

диапазона измерений расхода поверяемого счетчика.

6.2.3 Наблюдают на дисплее ИВК значения следующих параметров:

- частоты выходного сигнала поверяемого счетчика;
- объемного расхода поверочной жидкости;
- температуры и давления поверочной жидкости в поверяемом счетчике;
- температуры и давления поверочной жидкости на входе и выходе трубопоршневой поверочной установки (ТПУ) или температуры и давления поверочной жидкости в компакт-прувере (КП);
- температуры планки крепления детекторов или инварового стержня КП;
- кинематической вязкости поверочной жидкости (при наличии преобразователя вязкости);
- плотности, температуры и давления поверочной жидкости в ПП.

6.2.4 Запускают поршень ПУ. При срабатывании первого детектора наблюдают за началом отсчета импульсов выходного сигнала поверяемого счетчика, при срабатывании второго детектора – за окончанием отсчета импульсов. Для двунаправленных ТПУ проводят те же операции при движении поршня в обратном направлении.

6.3 Определение метрологических характеристик

6.3.1 При поверке счетчика определяют следующие МХ:

- коэффициенты преобразования счетчика в точках рабочего диапазона объемного расхода;
- среднее значение коэффициента преобразования счетчика в рабочем диапазоне объемного расхода (для случая реализации градуировочной характеристики (ГХ) счетчика в виде постоянного среднего коэффициента преобразования);
- границы относительной погрешности рабочего счетчика в рабочем диапазоне объемного расхода;
- границы относительной погрешности контрольного счетчика в точках рабочего диапазона объемного расхода.

6.3.2 Определение МХ поверяемого счетчика проводят не менее чем в трех точках рабочего диапазона объемного расхода, соответствующего технологическим условиям по месту эксплуатации счетчика (значение рабочего диапазона объемного расхода указывает владелец счетчика в заявлении, оформленном в произвольной форме). Значения объемного расхода (точки рабочего диапазона) рекомендуется выбирать с интервалом не более 20 % от максимального значения объемного расхода поверяемого счетчика.

В каждой точке рабочего диапазона измерений объемного расхода для рабочего счетчика проводят не менее пяти измерений, для контрольного счетчика проводят не менее семи измерений.

Последовательность выбора точек расхода может быть произвольной.

6.3.3 Для определения коэффициента преобразования поверяемого счетчика устанавливают выбранное значение объемного расхода по показаниям поверяемого счетчика и проводят предварительное измерение для уточнения значения установленного объемного расхода.

Запускают поршень ПУ. При срабатывании второго детектора регистрируют время между срабатываниями первого и второго детекторов, количество импульсов выходного сигнала поверяемого счетчика.

Объемный расход поверочной жидкости через поверяемый счетчик вычисляют по формуле (9).

При необходимости проводят корректировку значения объемного расхода регулятором расхода или запорной арматурой

6.3.4 После стабилизации объемного расхода в соответствии с 7.1.2 и стабилизации температуры поверочной жидкости в соответствии с 7.1.3 проводят необходимое количество измерений.

Запускают поршень ПУ. При срабатывании первого детектора ИВК начинает отсчет импульсов выходного сигнала поверяемого счетчика и времени, при срабатывании второго детектора – заканчивает.

Если количество импульсов выходного сигнала поверяемого счетчика за время между срабатываниями детекторов ПУ меньше 10000, то ИВК должен определять количество импульсов с долями.

Для определения средних значений за время измерения ИВК периодически фиксирует значения следующих параметров:

- температуры поверочной жидкости на входе и выходе ТПУ или в КП;
- давления поверочной жидкости на входе и выходе ТПУ или в КП;
- температуры планки крепления детекторов или инварового стержня КП;
- температуры поверочной жидкости в поверяемом счетчике;
- давления поверочной жидкости в поверяемом счетчике;
- плотность поверочной жидкости, измеренную ПП;
- температуру поверочной жидкости в ПП;
- давление поверочной жидкости в ПП;
- кинематическую вязкость поверочной жидкости, измеренную преобразователем вязкости (при наличии преобразователя вязкости).

Перечень параметров допускается изменять в зависимости от алгоритмов, реализованных в ИВК.

При использовании термометров и манометров с визуальным отсчетом допускается фиксировать температуру и давление один раз за время измерения.

Для однонаправленной ТПУ прохождение поршня от одного детектора до другого принимают за одно измерение.

Если для двунаправленной ТПУ определена вместимость калиброванного участка как сумма вместимостей в обоих направлениях, то за одно измерение принимают движение поршня в прямом и обратном направлении, количество импульсов и время прохождения поршня в прямом и обратном направлениях суммируют.

Если для двунаправленной ТПУ определена вместимость калиброванного участка для каждого направления, то за одно измерение принимают движение поршня в каждом направлении.

При наличии у ТПУ двух и более пар детекторов допускается использовать две и более пары детекторов.

При использовании КП допускается за результат измерения считать среднее значение результатов измерений для нескольких проходов поршня (не более 20).

6.3.5 Результаты измерений заносят в протокол. Рекомендуемая форма протокола поверки рабочего счетчика приведена в приложении А, контрольного счетчика – в приложении Б. Допускается в таблицах протокола удалять ненужные и добавлять необходимые столбцы и строки.

При заполнении протокола полученные результаты измерений и вычислений округляют в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3 – Точность представления результатов измерений и вычислений

| Параметр | Единица измерения | Количество цифр после запятой | Количество значащих цифр, не менее |
|----------------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Объем | м ³ | – | 6 |
| Температура | °С | 2 | – |
| Давление | МПа | 2 | – |
| Плотность | кг/м ³ | 1 | – |
| Кинематическая вязкость | мм ² /с | 1 | – |
| Количество импульсов | имп | – | 5 |
| Интервал времени | с | 2 | – |
| Погрешность, СКО | % | 3 | – |
| Коэффициент преобразования | имп/м ³ | – | 5 |
| Коэффициент коррекции | | 5 | – |
| Коэффициент объемного расширения | 1/°С | 6 | – |
| Коэффициент сжимаемости | 1/МПа | 6 | – |

Примечание – если количество цифр в целой части числа больше рекомендованного количества значащих цифр, то число округляют до целого.

7 Обработка результатов измерений

7.1 Объем жидкости, прошедшей через поверяемый счетчик за время i -го измерения в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода V_{ji} , м³, вычисляют по формуле

$$V_{ji} = V_0 \cdot K_{t_{nyji}} \cdot K_{p_{nyji}} \cdot K_{t_{жji}} \cdot K_{p_{жji}} \quad (2)$$

где V_0 – вместимость калиброванного участка ПУ при стандартных (базовых) условиях ($t = 15$ °С или 20 °С и $P_{изб} = 0$ МПа), м³. Значение берут из свидетельства о поверке или сертификата калибровки ПУ;

$K_{t_{nyji}}$ – коэффициент, учитывающий влияние температуры на вместимость ПУ при i -м измерении в j -й точке диапазона расхода, который определяют по формуле (3);

$K_{p_{nyji}}$ – коэффициент, учитывающий влияние давления на вместимость ПУ при i -м измерении в j -й точке диапазона расхода, который определяют по формуле (5). Вариант вычислений выбирают в соответствии с методикой, по которой была проведена поверка ПУ;

$K_{t_{жji}}$ – коэффициент, учитывающий влияние разности температуры в ПУ и поверяемом счетчике на объем жидкости при i -м измерении в j -й точке диапазона расхода, который определяют по формуле (7);

$K_{p_{жji}}$ – коэффициент, учитывающий влияние разности давления в ПУ и поверяемом счетчике на объем жидкости при i -м измерении в j -й точке диапазона расхода, который определяют по формуле (8)

$$K_{t_{nyji}} = \begin{cases} 1 + 3 \cdot \alpha_{ny} \cdot (t_{nyji} - t_0) & \text{при поверке по ТПУ,} \\ 1 + 2 \cdot \alpha_{ny} \cdot (t_{nyji} - t_0) + \alpha_{icm} \cdot (t_{cmji} - t_0) & \text{при поверке по КП} \end{cases}, \quad (3)$$

где $\alpha_{t_{ny}}$ – коэффициент линейного расширения материала стенок калиброванного

участка ПУ, 1/°С. Значение берут из технической документации на ПУ или определяют в соответствии с таблицей Г.2 приложения Г;

- $\alpha_{\text{ст}}$ – коэффициент линейного расширения материала планки крепления детекторов или инварового стержня, 1/°С. Значение берут из технической документации на КП или определяют в соответствии с таблицей Г.2 приложения Г;
- t_0 – значение температуры 15 или 20 °С, соответствующее стандартным (базовым) условиям. Принимают в соответствии со свидетельством о поверке или сертификатом калибровки ПУ;
- $t_{\text{ст}ji}$ – температура планки крепления детекторов или инварового стержня за время i -го измерения в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода (при отсутствии датчика температуры принимают равной температуре окружающей среды), °С;
- $t_{\text{пу}ji}$ – средняя температура жидкости в ПУ за время i -го измерения в j -й точке диапазона расхода, °С. При применении ТПУ определяют по формуле

$$t_{\text{пу}ji} = \frac{t_{\text{вхпу}ji} + t_{\text{выхпу}ji}}{2} \quad (4)$$

- где $t_{\text{вхпу}ji}, t_{\text{выхпу}ji}$ – температура поверочной жидкости на входе и выходе ТПУ за время i -го измерения в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, °С.

$$K_{\text{пу}ji} = \begin{cases} 1 + \frac{0,95 \cdot D}{E \cdot S} \cdot P_{\text{пу}ji} & \text{вариант 1,} \\ 1 + \frac{D}{E \cdot S} \cdot P_{\text{пу}ji} & \text{вариант 2} \end{cases} \quad (5)$$

- где D – внутренний диаметр калиброванного участка ПУ (значение берут из технической документации на ПУ), мм;
- S – толщина стенок калиброванного участка ПУ (значение берут из технической документации на ПУ), мм;
- E – модуль упругости материала стенок калиброванного участка ПУ (значение берут из технической документации на ПУ или определяют в соответствии с таблицей Г.2 приложения Г), МПа;
- $P_{\text{пу}ji}$ – среднее давление жидкости в ПУ за время i -го измерения в j -й точке диапазона расхода, МПа. При применении ТПУ определяют по формуле

$$P_{\text{пу}ji} = \frac{P_{\text{вхпу}ji} + P_{\text{выхпу}ji}}{2} \quad (6)$$

- где $P_{\text{вхпу}ji}, P_{\text{выхпу}ji}$ – давление поверочной жидкости на входе и выходе ТПУ за время i -го измерения в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, МПа.

$$K_{\text{тж}ji} = 1 + \beta_{\text{ж}ji} \cdot (t_{\text{сч}ji} - t_{\text{пу}ji}), \quad (7)$$

- где $t_{\text{сч}ji}$ – температура жидкости в счетчике за время i -го измерения в j -й точке диапазона расхода, °С;
- $\beta_{\text{ж}ji}$ – коэффициент объемного расширения жидкости для i -го измерения в j -й точке диапазона расхода, 1/°С. Для нефти и нефтепродуктов определяют в соответствии с Р 50.2.076, для воды принимают равным $2,6 \cdot 10^{-4}$.

$$K_{ржji} = 1 + \gamma_{жji} \cdot (P_{пуji} - P_{счji}), \quad (8)$$

где $P_{счji}$ – давление жидкости в счетчике за время i -го измерения в j -й точке диапазона расхода, МПа.

$\gamma_{жji}$ – коэффициент сжимаемости жидкости для i -го измерения в j -й точке диапазона расхода, 1/МПа. Для нефти и нефтепродуктов определяют в соответствии с Р 50.2.076, для воды принимают равным $4,91 \cdot 10^{-4}$.

Вычисление объема жидкости, прошедшей через поверяемый счетчик за время измерения, допускается проводить согласно алгоритму, реализованному в ИВК, прошедшему испытания для целей утверждения типа.

7.2 Объемный расход поверочной жидкости через поверяемый счетчик за время i -го измерения в j -й точке диапазона объемного расхода, Q_{ji} , м³/ч, вычисляют по формуле

$$Q_{ji} = \frac{V_{ji}}{T_{ji}} \cdot 3600, \quad (9)$$

где V_{ji} – объем жидкости, прошедший через поверяемый счетчик за время i -го измерения в j -й точке диапазона расхода, м³;

T_{ji} – время i -го измерения в j -й точке диапазона расхода, с.

7.3 Объемный расход поверочной жидкости через поверяемый счетчик в j -й точке диапазона объемного расхода, Q_j , м³/ч вычисляют по формуле

$$Q_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} Q_{ji}}{n_j}, \quad (10)$$

где n_j – количество измерений в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода.

7.4 Частоту выходного сигнала поверяемого счетчика для i -го измерения в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, f_{ji} , Гц, вычисляют по формуле

$$f_{ji} = \frac{N_{ji}}{T_{ji}}, \quad (11)$$

где N_{ji} – количество импульсов от поверяемого счетчика за время i -го измерения в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, имп.

7.5 Частоту выходного сигнала поверяемого счетчика в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, f_j , Гц, вычисляют по формуле

$$f_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} f_{ji}}{n_j}. \quad (12)$$

7.6 Коэффициент преобразования поверяемого счетчика для i -го измерения в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, K_{ji} , имп/м³, вычисляют по формуле

$$K_{ji} = \frac{N_{ji}}{V_{ji}}. \quad (13)$$

7.7 Коэффициент преобразования поверяемого счетчика в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, K_j , имп/м³, вычисляют по формуле

$$K_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} K_{ji}}{n_j}. \quad (14)$$

7.8 Среднее значение коэффициента преобразования поверяемого счетчика в рабочем диапазоне объемного расхода, K_d , имп/м³ (для случая реализации ГХ счетчика в виде постоянного среднего коэффициента преобразования), вычисляют по формуле

$$K_d = \frac{\sum_{j=1}^m K_j}{m}, \quad (15)$$

где m – количество точек расхода.

7.9 Среднее значение кинематической вязкости поверочной жидкости за время поверки, ν , мм²/с вычисляют по формуле

$$\nu = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} \nu_{ji}}{\sum_{j=1}^m n_j} & \text{при наличии преобразователя вязкости,} \\ \frac{\nu_n + \nu_k}{2} & \text{при отсутствии преобразователя вязкости} \end{cases} \quad (16)$$

где ν_{ji} – кинематическая вязкость поверочной жидкости для i -го измерения в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, мм²/с;

ν_n, ν_k – кинематическая вязкость поверочной жидкости, определенная в испытательной лаборатории в начале и в конце поверки соответственно, мм²/с.

7.10 СКО результатов измерений в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, S_j , %, определяют по формуле

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (K_{ji} - K_j)^2}{n_j - 1}} \cdot \frac{1}{K_j} \cdot 100. \quad (17)$$

7.11 Проверяют выполнение условия:

$$S_j \leq S_{j\text{доп}} \quad (18)$$

где $S_{j\text{доп}}$ – предельно допустимое значение СКО в соответствии с описанием типа счетчика, %.

7.12 При выполнении условия (18) продолжают обработку результатов измерений.

При невыполнении условия (18) выявляют наличие промахов в полученных результатах измерений, согласно приложения В. Выявленный промах исключают и проводят дополнительное измерение.

При отсутствии промахов выявляют и устраняют причины, вызвавшие невыполнение условия (18) и повторно выполняют измерения.

7.13 СКО среднего значения результатов измерений в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, S_{0j} , %, определяют по формуле

$$S_{0j} = \frac{S_j}{\sqrt{n_j}}. \quad (19)$$

7.14 СКО среднего значения результатов измерений в рабочем диапазоне объемного расхода, S_0 , %, определяют по формуле

$$S_0 = \max(S_{0j}) \quad (20)$$

7.15 Границу случайной погрешности поверяемого счетчика в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода при доверительной вероятности $P=0,95$, ε_j , %, вычисляют по формуле

$$\varepsilon_j = t_{0,95j} \cdot S_{0j}, \quad (21)$$

где $t_{0,95j}$ – квантиль распределения Стьюдента для количества измерений n_j (определяют по таблице Г.1 приложения Г).

7.16 Границу случайной погрешности поверяемого счетчика в рабочем диапазоне объемного расхода при доверительной вероятности $P = 0,95$, ε , %, определяют по формуле

$$\varepsilon = \max(\varepsilon_j) \quad (22)$$

7.17 Границу неисключенной систематической погрешности поверяемого счетчика в рабочем диапазоне объемного расхода, θ_{Σ} , %, определяют по формуле

$$\theta_{\Sigma} = 1,1 \cdot \sqrt{\theta_{\Sigma 0}^2 + \theta_{V0}^2 + \theta_{\varepsilon}^2 + \theta_A^2 + \theta_{ИВК}^2 + \theta_{ПВ}^2} \quad (23)$$

- где $\theta_{\Sigma 0}$ – граница суммарной неисключенной систематической погрешности ПУ, %. Значение берут из свидетельства о поверке или сертификата калибровки ПУ;
- θ_{V0} – граница неисключенной систематической погрешности определения среднего значения вместимости ПУ, %; Значение берут из свидетельства о поверке или сертификата калибровки ПУ. Для ТПУ с двумя и более парами детекторов берут наибольшее значение (из числа использующихся при поверке).
- $\theta_{ИВК}$ – предел допускаемой относительной погрешности преобразования входных электрических сигналов в значение коэффициента преобразования ИВК (средства поверки), %. Значение берут из свидетельства или протокола поверки ИВК;
- $\theta_{ПВ}$ – предел допускаемой относительной погрешности преобразования входных электрических сигналов в значение объема рабочей среды ПВ, %. Значение берут из свидетельства или протокола поверки ПВ. Значение принимают равным нулю в случае если в состав счетчика ПВ не входит;
- θ_A – граница неисключенной систематической погрешности, обусловленной видом аппроксимации градуировочной характеристики поверяемого счетчика в рабочем диапазоне объемного расхода, %. Определяют по формуле

$$\theta_A = \begin{cases} \max \left| \frac{K_j - K_D}{K_D} \right| \cdot 100 & \text{при реализации ГХ в виде постоянного среднего} \\ & \text{коэффициента преобразования,} \\ \max \left(0,5 \cdot \left| \frac{K_j - K_{j+1}}{K_j + K_{j+1}} \right| \cdot 100 \right) & \text{при кусочно-линейной аппроксимации ГХ} \end{cases} \quad (24)$$

- θ_{ε} – граница неисключенной систематической погрешности, обусловленной погрешностью СИ температуры при измерениях температуры жидкости в ПУ и поверяемом счетчике, %. Определяют по формуле

$$\theta_t = \beta_{ж\max} \cdot 100 \cdot \sqrt{\Delta t_{пу}^2 + \Delta t_{сч}^2} \quad (25)$$

где $\Delta t_{пу}$ – предел допускаемой абсолютной погрешности СИ температуры, установленных в ПУ, °С. Значение берут из свидетельства о поверке СИ температуры;

$\Delta t_{сч}$ – предел допускаемой абсолютной погрешности СИ температуры, установленного около поверяемого счетчика, °С. Значение берут из свидетельства о поверке СИ температуры;

$\beta_{ж\max}$ – максимальное значение коэффициента объемного расширения поверочной жидкости за время поверки, $1/^\circ\text{C}$, которое определяют по формуле

$$\beta_{ж\max} = \max(\beta_{ж\text{ji}}) \quad (26)$$

10.18 Границу неисключенной систематической погрешности поверяемого счетчика, использующегося в качестве контрольного, в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, $\theta_{\Sigma j}$, %, определяют по формуле

$$\theta_{\Sigma j} = 1,1 \cdot \sqrt{\theta_{\Sigma 0}^2 + \theta_{V0}^2 + \theta_t^2 + \theta_{ИВК}^2 + \theta_{ПВ}^2} \quad (27)$$

10.19 Границу относительной погрешности поверяемого счетчика в рабочем диапазоне объемного расхода δ , %, определяют по формулам

$$\delta = \begin{cases} \varepsilon & \text{если } \frac{\theta_{\Sigma}}{S_0} < 0,8, \\ t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma} & \text{если } 0,8 \leq \frac{\theta_{\Sigma}}{S_0} \leq 8, \\ \theta_{\Sigma} & \text{если } \frac{\theta_{\Sigma}}{S_0} > 8. \end{cases} \quad (28)$$

где S_{Σ} – суммарное СКО результатов измерений в рабочем диапазоне объемного расхода, %, которое определяют по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\theta}^2 + S_0^2}, \quad (29)$$

где S_{θ} – СКО суммы неисключенных систематических погрешностей, %, которое определяют по формуле

$$S_{\theta} = \sqrt{\frac{\theta_{\Sigma 0}^2 + \theta_{V0}^2 + \theta_t^2 + \theta_A^2 + \theta_{ИВК}^2 + \theta_{ПВ}^2}{3}}. \quad (30)$$

t_{Σ} – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешностей, который определяют по формуле

$$t_{\Sigma} = \frac{\varepsilon + \theta_{\Sigma}}{S_0 + S_{\theta}}. \quad (31)$$

7.20 Границу относительной погрешности поверяемого счетчика, использующегося в качестве контрольного, в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, δ_j , %, определяют по формулам

$$\delta_j = \begin{cases} \varepsilon_j & \text{если } \frac{\theta_{\Sigma j}}{S_{0j}} < 0,8, \\ t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma} & \text{если } 0,8 \leq \frac{\theta_{\Sigma j}}{S_{0j}} \leq 8, \\ \theta_{\Sigma} & \text{если } \frac{\theta_{\Sigma j}}{S_{0j}} > 8. \end{cases} \quad (32)$$

где $S_{\Sigma j}$ – суммарное СКО результатов измерений в j-й точке рабочего диапазона объемного расхода, %, которое определяют по формуле

$$S_{\Sigma j} = \sqrt{S_{\theta j}^2 + S_{0j}^2}, \quad (33)$$

где $S_{\theta j}$ – СКО суммы неисключенных систематических погрешностей в j-й точке рабочего диапазона объемного расхода, %, которое определяют по формуле

$$S_{\theta j} = \sqrt{\frac{\theta_{\Sigma 0}^2 + \theta_{V0}^2 + \theta_t^2 + \theta_{\text{ИВК}}^2 + \theta_{\text{ПВ}}^2}{3}}. \quad (34)$$

$t_{\Sigma j}$ – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешностей, который определяют по формуле

$$t_{\Sigma j} = \frac{\varepsilon_j + \theta_{\Sigma j}}{S_{0j} + S_{\theta j}}. \quad (35)$$

7.21 Проверяют выполнение условий

$$\delta \leq \delta_{\text{доп}} \quad (36)$$

$$\delta_j \leq \delta_{j\text{доп}} \quad (37)$$

где $\delta_{\text{доп}}$ – предел допускаемой относительной погрешности в диапазоне объемного расхода в соответствии с описанием типа счетчика, %;

$\delta_{j\text{доп}}$ – предел допускаемой относительной погрешности в точке диапазона объемного расхода в соответствии с описанием типа счетчика, %.

Если условия (36), (37) не выполняются, то рекомендуется:

- увеличить количество точек в рабочем диапазоне объемного расхода;
- увеличить количество измерений в точках рабочего диапазона объемного расхода;
- увеличить количество проходов поршня за одно измерение (при поверке по КП);
- уменьшить рабочий диапазон объемного расхода.

При повторном невыполнении условий (36), (37) поверку прекращают.

8 ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВЕРКИ

8.1 Результаты поверки счетчика оформляют протоколом в двух экземплярах по форме, приведенной в приложении А для рабочего счетчика, в приложении Б – для контрольного счетчика. Для контрольно-резервного счетчика оформляют оба протокола.

При оформлении протоколов средствами вычислительной техники или вручную допускается формы протоколов представлять в измененном виде.

8.2 При положительных результатах поверки счетчика оформляют свидетельство о

поверке по установленной форме в соответствии с приказом Минпромторга России от 02 июля 2015 г. № 1815 "Об утверждении Порядка проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке".

В свидетельстве указывают пределы допускаемой относительной погрешности в диапазоне расхода – для рабочих счетчиков; пределы допускаемой относительной погрешности в точках диапазона расхода – для контрольных счетчиков.

Для расширения рабочего диапазона вязкости рабочей жидкости допускается использовать семейство градуировочных характеристик, определенных в межповерочный интервал при нескольких значениях вязкости.

Протокол поверки является обязательным приложением к свидетельству о поверке.

8.3 Выполняют пломбирование счетчиков.

8.4 При отрицательных результатах поверки счетчик к эксплуатации не допускают, действующее свидетельство о предыдущей поверке аннулируют и оформляют извещение о непригодности в соответствии с Приказом Минпромторга России от 02 июля 2015 г. №1815.

Приложение А
(рекомендуемое)

Форма протокола поверки рабочего счетчика

ПРОТОКОЛ № _____

поверки рабочего счетчика с помощью ПУ

Место проведения поверки: _____

Счетчик: Тип ПР _____ Зав. № _____

Тип вторичного прибора _____ Зав. № _____

ПУ: Тип _____ Зав. № _____

ИВК: Тип _____ Зав. № _____

Поверочная жидкость _____ Вязкость, мм²/с, _____

Таблица 1 – Исходные данные

| Детекторы | V_0 , м ³ | D, мм | S, мм | E, МПа | $\alpha_{tпу}$, 1/°C | $\alpha_{tст}$, 1/°C | $\theta_{\Sigma 0}$, % | θ_{V0} , % |
|-----------|---------------------------|----------|----------|-----------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| | | | | | | | | |

Окончание таблицы 1

| $\Delta t_{пу}$, °C | $\Delta t_{ст}$, °C | $\theta_{ИВК}$, % | $\theta_{ПВ}$, % |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| 10 | 11 | 12 | 12 |
| | | | |

Таблица 2 – Результаты измерений и вычислений

| № точ / № изм | Q_{ji} , м ³ /ч | Детекторы | T_{ji} , с | $t_{пуji}$, °C | $P_{пуji}$, МПа | $t_{стji}$, °C | $\rho_{ппji}$, кг/м ³ | $t_{ппji}$, °C |
|------------------|---------------------------------|-----------|-----------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1/1 | | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 1/n ₁ | | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| m/1 | | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| m/n _m | | | | | | | | |

Окончание таблицы 2

| № точ./ № изм. | $P_{ппji}$, МПа | $\beta_{жji}$, 1/°C | $\gamma_{жji}$, 1/МПа | $t_{счji}$, °C | $P_{счji}$, МПа | f_{ji} , Гц | N_{ji} , имп | K_{ji} , имп/м ³ |
|-------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|
| 1 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 1/1 | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| 1/n ₁ | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| m/1 | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| m/n _m | | | | | | | | |

Таблица 3 – Результаты поверки в точках рабочего диапазона

| № точ. | Q_j , м ³ /ч | f_j , Гц | K_j , имп/м ³ | S_j , % | n_j | S_{0j} , % | $t_{0,95j}$ | ε_j , % |
|--------|------------------------------|---------------|-------------------------------|--------------|-------|-----------------|-------------|------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | | | | | ... |
| m | | | | | | | | |

Таблица 4 – Результаты поверки в рабочем диапазоне

| Q_{\min} , м ³ /ч | Q_{\max} , м ³ /ч | K_d , имп/м ³ | S_0 , % | ε , % | θ_A , % | θ_t , % | θ_{Σ} , % | δ , % |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------|----------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| | | | | | | | | |

Заключение: Счетчик к дальнейшей эксплуатации _____
(годен, не годен)

Подпись лица, проводившего поверку _____ / _____
подпись И. О. Фамилия

Дата проведения поверки " ____ " _____ 20 ____ г.

Примечание – Столбец 3 таблицы 4 заполняют только при реализации ГХ счетчика в виде постоянного среднего коэффициента преобразования.

Приложение Б
(рекомендуемое)

Форма протокола поверки контрольного счетчика

ПРОТОКОЛ № _____

поверки контрольного счетчика с помощью ПУ

Место проведения поверки: _____

Счетчик: Тип ПР _____ Зав. № _____

Тип вторичного прибора _____ Зав. № _____

ПУ: Тип _____ Зав. № _____

ИВК: Тип _____ Зав. № _____

Поверочная жидкость _____ Вязкость, мм²/с, _____

Таблица 1– Исходные данные

| Детекторы | V_0 , м ³ | D, мм | S, мм | E, МПа | $\alpha_{tпу}$, 1/°C | $\alpha_{tст}$, 1/°C | $\theta_{\Sigma 0}$, % | θ_{V0} , % |
|-----------|---------------------------|----------|----------|-----------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| | | | | | | | | |

Окончание таблицы 1

| $\Delta t_{пу}$, °C | $\Delta t_{сч}$, °C | $\theta_{ИВК}$, % | $\theta_{ПВ}$, % |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| 10 | 11 | 12 | 12 |
| | | | |

Таблица 2 – Результаты измерений и вычислений

| № точ / № изм | Q_{ji} , м ³ /ч | Детекторы | T_{ji} , с | $t_{пуji}$, °C | $P_{пуji}$, МПа | $t_{стji}$, °C | $\rho_{ппji}$, кг/м ³ | $t_{ппji}$, °C |
|------------------|---------------------------------|-----------|-----------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1/1 | | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 1/n ₁ | | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| m/1 | | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| m/n _m | | | | | | | | |

Окончание таблицы 2

| № точ./ № изм. | $P_{ппji}$, МПа | $\beta_{жji}$, 1/°C | $\gamma_{жji}$, 1/МПа | $t_{счji}$, °C | $P_{счji}$, МПа | f_{ji} , Гц | N_{ji} , имп | K_{ji} , имп/м ³ |
|-------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|------------------|-------------------|----------------------------------|
| 1 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 1/1 | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| 1/n ₁ | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| m/1 | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| m/n _m | | | | | | | | |

Таблица 3 – Результаты поверки в точках рабочего диапазона

| № точ. | Q_j , м ³ /ч | f_j , Гц | K_j , имп/м ³ | S_j , % | n_j | S_{0j} , % | $t_{0,95j}$ | ε_j , % |
|--------|------------------------------|---------------|-------------------------------|--------------|-------|-----------------|-------------|------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | | | | | ... |
| m | | | | | | | | |

Окончание таблицы 3

| № точ. | θ_r , % | $\theta_{\Sigma j}$, % | δ_j , % |
|--------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| 1 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | | | |
| ... | | | |
| m | | | |

Заключение: Счетчик к дальнейшей эксплуатации _____
(годен, не годен)

Подпись лица, проводившего поверку _____ / _____
подпись И. О. Фамилия

Дата проведения поверки " ____ " _____ 20 ____ г.

1. Приложение В (рекомендуемое)

Методика анализа результатов измерений на наличие промахов

Проверку результатов измерений на один промах по критерию Граббса при определении метрологических характеристик выполняют в следующей последовательности.

Определяют СКО результатов измерений в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, S_{Kj} по формуле

$$S_{Kj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (K_{ji} - K_j)^2}{n_j - 1}} \quad (\text{В.1})$$

- где K_{ji} – коэффициент преобразования поверяемого счетчика для i -го измерения в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, имп/м³;
 K_j – коэффициент преобразования поверяемого счетчика в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода, имп/м³;
 n_j – количество измерений в j -й точке рабочего диапазона объемного расхода.

Примечание: При $S_{Kj} < 0,001$ принимают $S_{Kj} = 0,001$.

Определяют наиболее выделяющееся соотношение U

$$U = \max \left(\left| \frac{K_{ji} - K_j}{S_{Kj}} \right| \right) \quad (\text{В.2})$$

Если значение U больше или равно значению h , взятому из таблицы В.1, то результат измерения должен быть исключен как промах.

Таблица В.1 – Критические значения для критерия Граббса

| n | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| h | 1,155 | 1,481 | 1,715 | 1,887 | 2,020 | 2,126 | 2,215 | 2,290 | 2,355 | 2,412 |

Приложение Г
(справочное)

Справочные материалы

Г.1 Квантиль распределения Стьюдента

Значения квантиля распределения Стьюдента $t_{0,95}$ при доверительной вероятности $P=0,95$ в зависимости от количества измерений приведены в таблице Г.1.

Таблица Г.1

| | | | | | | | | | | | |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| n-1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| $t_{0,95}$ | 12,706 | 4,303 | 3,182 | 2,776 | 2,571 | 2,447 | 2,365 | 2,306 | 2,262 | 2,228 | 2,201 |

2. Г.2 Коэффициенты линейного расширения и модули упругости

Значения коэффициентов линейного расширения и модули упругости материалов стенок калиброванного участка ПУ, материала планки крепления детекторов в зависимости от материала приведены в таблице Г.2.

Таблица Г.2

| Материал | $\alpha_t, 1/^\circ\text{C}$ | E, МПа |
|------------------------|------------------------------|-------------------|
| Сталь углеродистая | $1,12 \cdot 10^{-5}$ | $2,07 \cdot 10^5$ |
| Сталь нержавеющая 304 | $1,73 \cdot 10^{-5}$ | $1,93 \cdot 10^5$ |
| Сталь нержавеющая 316 | $1,59 \cdot 10^{-5}$ | $1,93 \cdot 10^5$ |
| Сталь нержавеющая 17-4 | $1,08 \cdot 10^{-5}$ | $1,97 \cdot 10^5$ |
| Инвар | $1,44 \cdot 10^{-6}$ | - |