

САФОНОВ Андрей Васильевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОЛИЧЕСТВА НЕФТИ И  
НЕФТЕПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕСОВЫХ  
ПОВЕРОЧНЫХ УСТАНОВОК**

05.11.15 – Метрология и метрологическое обеспечение

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель -  
доктор технических наук, профессор  
Конопелько Леонид Алексеевич

Санкт-Петербург

2015

## Оглавление

Введение .....	4
Глава 1. Аналитический обзор метрологического обеспечения .....	9
измерений количества нефти и нефтепродуктов.....	9
1.1 Системы измерений количества и показателей качества нефти и нефтепродуктов .....	9
1.2 Методики поверки средств измерений.....	9
1.3 Анализ методик поверки и метрологических характеристик средств поверки .....	22
1.4 Выводы по главе 1 .....	25
2 Разработка и исследования методик поверки поверочных установок с применением специальных весов .....	27
2.1 Исследования метрологических характеристик специальных весов по методике с применением компаратора .....	27
2.2 Исследования метрологических характеристик эталонного мерника .....	28
2.3 Исследования метрологических характеристик специальных весов по методике без применения компаратора .....	30
2.4 Исследования метрологических характеристик эталонного мерника по методике без применения компаратора .....	36
2.5 Исследования метрологических характеристик трубопоршневой поверочной установки	44
2.6 Исследования метрологических характеристик компакт-прувера.....	46
2.7 Выводы по главе 2 .....	48
Глава 3. Новая методика поверки поверочных установок с применением специальных весов	50
3.1 Методика поверки специальных весов и определение калибровочных коэффициентов ...	50
3.2 Поверка эталонного мерника .....	51
3.3 Методика поверки трубопоршневых поверочных установок .....	57
3.4 Методика поверки компакт-прувера .....	65
3.5 Выводы по главе 3 .....	74
Глава 4. Методика передачи единиц величин от исходного эталона рабочим средствам измерений.....	76
4.1 Определение метрологических характеристик специальных весов .....	76
4.2 Определение метрологических характеристик эталонного мерника .....	76
4.3 Определение метрологических характеристик поверочных установок.....	76
4.3.1 Трубопоршневая поверочная установка .....	76
4.3.2 Компакт-прувер .....	79
4.3.3 Фактические МХ весов, мерников и поверочных установок.....	81

4.4 Передача единиц величин от ГПЭ массы и силы средствам измерений поверочного комплекса .....	82
4.5 Выводы по главе 4 .....	85
Глава 5. Внедрение в практику результатов работы .....	87
5.1 Совершенствование МО измерений при поверке весов, эталонных мерников и поверочных установок .....	87
5.2 Внедрение результатов работы в ЗАО «Нефтегазметрология» .....	87
5.3 Назначение поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» .....	90
5.4 Выводы по главе 5 .....	91
Заключение.....	93
Список основных сокращений и условных обозначений.....	95
Список использованных источников.....	97
Приложение А.....	105
Приложение Б .....	1078
Приложение В .....	110
Приложение Г .....	112
Приложение Д.....	114
Приложение Е .....	117
Приложение Ж.....	120

## Введение

### Актуальность работы

Представленная работа посвящена актуальной задаче совершенствования метрологического обеспечения (МО) измерений массы и объема нефти и нефтепродуктов (углеводородные жидкости) при учетных операциях.

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) обеспечивает в настоящее время десятую часть внутреннего валового продукта, а экспорта – более половины<sup>1</sup>. Одно из основных направлений деятельности ТЭК – добыча и переработка нефти, транспортировка и хранение нефти и жидких нефтепродуктов. Получение достоверных данных о количестве нефти и нефтепродуктов – приоритетная задача<sup>2</sup>, решение которой требует совершенствования и опережающего развития метрологического обеспечения (МО).

Метрологические исследования, направленные на создание оборудования для поверки средств измерений массы, объёма, расхода, плотности, влагосодержания и вязкости, входящих в автоматизированные системы учёта нефти и нефтепродуктов, ведутся широким фронтом более 40 лет. Наибольший научный вклад в развитие метрологического обеспечения систем учета внесён специалистами ФГУП ВНИИМ, ФГУП ВНИИР, ФГУП ВНИИМС, ООО «ИМС Индастриз», МОАО «Нефтеавтоматика», ОАО «Сибнефтеавтоматика».

Постановка данной работы была обусловлена сформировавшейся в середине прошлого десятилетия потребностью крупных предприятий ТЭК в поверочных комплексах, ориентированных на локально сосредоточенные совокупности средств измерений (в том числе импортных), имеющих высокие метрологические характеристики. Необходимо было достичь высокой точности передачи размера единиц массы и объёма от поверочного комплекса рабочим средствам измерений. При этом должна обеспечиваться прослеживаемость к первичным эталонам единиц основных величин, заданная производительность поверки и возможность её проведения в рабочих условиях эксплуатации поверяемых измерительных преобразователей объемного и массового расхода, счетчиков жидкости, компакт-пруверов, трубопоршневых поверочных установок (ТПУ) 1-го и 2-го разрядов.

**Цель работы:** совершенствование метрологического обеспечения измерений количества нефти и нефтепродуктов путём реализации новых технических и методических решений измерений массы и объёма.

---

<sup>1</sup> Комитет по природным ресурсам, природопользованию и экологии Государственной Думы Российской Федерации, рекомендации парламентских слушаний на тему: «Законодательное обеспечение организации системы баланса извлечения и потребления углеводородного сырья на территории Российской Федерации и ее континентальном шельфе», 05.03.2014 г.

<sup>2</sup> Комиссия при президенте по вопросам стратегии развития топливно-энергетического комплекса и экологической безопасности, 4.06.2014 г.

### **Основные задачи исследований:**

- анализ и оценка состояния метрологического обеспечения измерений массы и объема углеводородных жидкостей для определения направлений совершенствования метрологического обеспечения измерений количества углеводородных жидкостей с целью повышения точности измерений при учетных операциях;
- исследования и оценивание вкладов неопределённости измерений при измерениях массы и объема, разработка методик измерений массы и объема углеводородных жидкостей на основе применения весов с трехкомпонентными весоизмерительными датчиками,
- разработка локальной поверочной схемы для средств измерений массы и объема углеводородных жидкостей для ЗАО «Нефтегазметрология»;
- разработка поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология».

### **Научная новизна**

- Для оптимизации системы передачи единиц величин, реализованной в локальной поверочной схеме ЗАО «Нефтегазметрология», были сопоставлены вклады различных источников неопределённости измерений массы и объема, которые показали, что наибольший вклад вносят измерения массы. С этой целью предложено передавать единицу массы исходному эталону единицы массы и объема от рабочего эталона единицы массы с прослеживаемостью к ГПЭ единицы массы [46].
- Показана возможность повышения точности измерений массы при поверке мерников и поверочных установок за счёт применения специальных весов, выполненных на основе трехкомпонентных весоизмерительных датчиков, позволивших учитывать вертикальную и боковые нагрузки, возникающие при взвешиваниях [46, 71].
- Разработана и обоснована локальная поверочная схема на основе исходного эталона и стандарт СТО НГМ 1.1-2014 для поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология», разработаны методики поверки, основанные на применении специальных весов ВСПМ [46].
- Разработаны рабочие эталоны единицы объема 1-го разряда, номера реестра 3.6.АВР.0001.2015 и 3.6.АВР.0002.2015, которые позволили в 1,7 раза улучшить метрологические характеристики рабочих эталонов единицы объёма [46].
- Разработаны мобильные эталонные поверочные установки с высокими метрологическими характеристиками, предназначенные для поверки стационарных поверочных установок (ПУ) на месте эксплуатации [46].
- Поверочный комплекс ЗАО «Нефтегазметрология» позволяет рациональным образом организовать поверку совокупности рабочих средств измерений массы, объема и

расхода в рабочих условиях, в которых они применяются при коммерческом учёте углеводородных жидкостей [9, 10, 46, 56].

#### **Практическая значимость**

- Разработан поверочный комплекс ЗАО «Нефтегазметрология» на основе исходного эталона единиц массы и объема жидкости с доверительной относительной погрешностью измерений объема углеводородных жидкостей  $\pm 0,03 \%$  [46].
- Разработанные методики поверки специальных весов ВСПМ на основе трехкомпонентных датчиков, измеряющих нагрузки по трем координатам, мерников и поверочных установок позволили в 2 раза сократить время на выполнение измерений и уменьшить вероятность брака поверки поверяемых СИ [71, 72, 74, 75].
- Технические и методические решения позволили в 7 раз уменьшить стоимость применяемого эталонного оборудования, необходимого для поверки эталонных мерников 1-го разряда и мерников высокого класса точности [46, 71, 72].
- Положительные результаты исследований позволили разработать мобильные эталонные поверочные установки с высокими метрологическими характеристиками, предназначенные для поверки стационарных поверочных установок (ПУ) на месте эксплуатации [46].

#### **Положения, выносимые на защиту**

- Для совершенствования метрологического обеспечения измерений количества углеводородных жидкостей проведены экспериментальные исследования, по результатам которых разработаны методики поверки мерников и поверочных установок на основе применения специальных весов ВСПМ с трехкомпонентными весоизмерительными датчиками, которые позволяют в 2 раза уменьшить погрешность измерений массы и объема эталонных мерников и в 1,7 раза поверочных установок [46, 71].
- Метрологические характеристики поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» с улучшенными метрологическими характеристиками, локальная поверочная схема СТО НГМ 1.1-2014 для средств измерений массы и объема, возглавляемая исходным эталоном, прослеживаемым к ГПЭ единицы массы [46].
- Специальные весы с доверительной относительной погрешностью измерений массы  $\pm 0,005 \%$  и эталонные мерники с доверительной относительной погрешностью измерений объема  $\pm 0,01 \%$  при доверительной вероятности 0,95, эталонные поверочные установки с доверительной относительной погрешностью измерений объема  $\pm 0,03 \%$  при доверительной вероятности 0,99 [46].

### **Внедрение результатов работы**

- Разработаны и внедрены в метрологическую практику методики поверки и стандарт СТО НГМ 1.1-2014 Локальная поверочная схема для средств измерений объема и массы нефти и нефтепродуктов поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» [46].
- Калибровочные и измерительные возможности определения объема поверочных установок подтверждены СМС Certificate number 39332546 VSL Dutch Metrology Institute, реестр СИ РФ под номером 44963, получен патент на полезную модель номер 102995 [78, 79, 80].
- По результатам диссертационной работы разработан и введен в эксплуатацию Белгородский поверочный комплекс ЗАО «Нефтегазметрология» на основе исходного эталона с улучшенными метрологическими характеристиками, рабочие эталоны единицы объема 1-го разряда утверждены приказом № 215 Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, внесены в реестр эталонов РФ под номерами 3.6.ABP.0001.2015, 3.6.ABP.0002.2015 [46].

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы были представлены на конференции «Метрология нефтегазовой отрасли» (г. Санкт-Петербург, 2009 г.), Метрологической конференции «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов» (г. Казань, 2010 г.), конференции «Нефтегаз 2011» (г. Москва, 2011 г.), конференции «Актуальные вопросы метрологического обеспечения учета жидкостей и газов» (г. Казань, 2011 г.), 3-ей Всероссийской конференции «Метрология и стандартизация нефтегазовой отрасли - 2013» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.), 2-й Международной метрологической конференции «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов» (г. Казань, 2014 г.) [81, 82, 83, 84, 86, 87, 88].

Апробация разработанных методик поверки, изложенных в диссертационной работе была выполнена в марте 2014 года на заводе ООО «СНГБ» в г. Калининград при определении объема эталонных мерников с номинальной вместимостью 1000 дм<sup>3</sup> с применением весов ВСПМ и поверочных установок с максимальными расходами 800 и 2200 м<sup>3</sup>/час из состава Белгородского поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» [46].

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 28 работ, в том числе: 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, 1 в периодических журналах, 1 ГОСТ, 1 стандарт организации, 1 патент на полезную модель, 1 сертификат НМИ VSL, 7 тезисов докладов на российских и международных метрологических конференциях, 14 нормативных документов.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора заключается в проведении анализа и оценке метрологических характеристик средств измерений массы и объема углеводородных жидкостей при учетных операциях. Для целей совершенствования метрологического обеспечения измерений количества углеводородных жидкостей разработаны метрологические и технические требования на изготовление специальных весов и поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» [46]. Проведены экспериментальные исследования по установлению фактических метрологических характеристик весов, мерников и поверочных установок поверочного комплекса, оптимизированы режимы измерений и выполнена оценка неопределенности измерений массы и объема. Разработана локальная поверочная схема и обоснована передача единицы величин от рабочих эталонов единицы массы по ГОСТ 8.021 [24] к исходному эталону из состава поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» [46]. Подтверждены калибровочные и измерительные возможности определения объема поверочных установок (СМС Certificate number 39332546) [79, 80]. Разработаны и внесены в реестр рабочие эталоны объема 1-го разряда 3.6.ABP.0001.2015, 3.6.ABP.0002.2015. Автор участвовал в разработке ГОСТ Р 54071-2010/Рекомендация OILM R 76 - 2:2007(E) «Весы неавтоматического действия. Часть 2. Формы протоколов испытаний» [29] и 14 нормативных документов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, приложений, заключения, списка литературы из 89 библиографических ссылок. Работа изложена на 120 страницах текста, содержит 27 таблиц, 16 рисунков.



## **Глава 1. Аналитический обзор метрологического обеспечения измерений количества нефти и нефтепродуктов**

### **1.1 Системы измерений количества и показателей качества нефти и нефтепродуктов**

В настоящее время оперативный и коммерческий учет перекачиваемой по трубопроводам углеводородных жидкостей осуществляется с помощью систем измерений количества и показателей качества нефти (СИКН) и нефтепродуктов СИКНП [7, 8, 9, 10, 56].

В соответствии со ст.9. "Требования к Средствам измерений" ФЗ "Об обеспечении единства измерений" [1] «В сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений к применению допускаются средства измерений утвержденного типа, прошедшие поверку, а также обеспечивающие соблюдение установленных законодательством Российской Федерации об обеспечении единства измерений обязательных требований, включая обязательные метрологические требования к измерениям, обязательные метрологические и технические требования к средствам измерений, и установленных законодательством Российской Федерации о техническом регулировании обязательных требований»[3].

Поверка средств измерений выполняется с использованием эталонов единиц величин [15], прослеживаемых к государственным первичным эталонам соответствующих единиц величин [19].

В настоящее время в РФ не существует эталона в области измерений объема, работающего на углеводородных жидкостях при объемном расходе до 2200 м<sup>3</sup>/час, а существующая УВТ по ГОСТ 8.510, работающая на воде в качестве рабочей жидкости, не может воспроизводить рабочие условия измерительных преобразователей массы и объема на углеводородных жидкостях в широких диапазонах вязкости и плотности.

Для обеспечения достоверных измерений испытания и поверку преобразователей массы и объема необходимо выполнять на рабочих жидкостях [7, 8, 9, 10, 56].

### **1.2 Методики поверки средств измерений**

Основным эталонным средством, определяющим метрологические характеристики СИКН и СИКНП являются поверочные установки (ПУ), с помощью которых производится поверка измерительных преобразователей массы и объема [11]. Погрешность [38] измерительных преобразователей определяется погрешностью поверочных установок, которые бывают двух типов: трубопоршневые поверочные установки (ТПУ) и компакт-прувера (КП).

Для поверки ПУ 1-го разряда применяют методики на базе весов и эталонных мерников 1-го разряда, а для ПУ 2-го разряда применяют ПУ 1-го разряда. Действующие методики уже устарели и не учитывают последние достижения в области измерительной техники, интенсивно развивающееся в последнее десятилетие.

Методика поверки МИ 1971-95 «Установки поверочные на базе весов ОГВ» [48] применяется для поверки ПУ 1-го разряда. Основные средства измерений (СИ) методики - это образцовые грузопоршневые весы (ОГВ) [48] с перекидным устройством. Погрешность измерений массы весами ОГВ существенно зависит от погрешности и чувствительности весоизмерительной системы, погрешности перекидного устройства, имеющей движущиеся элементы, которые подвержены истиранию, а значит неизбежному изменению метрологических характеристик во время эксплуатации.

Относительная погрешность весов ОГВ определяется по формуле:

$$\delta_{\text{огв}} = ( M_{\text{в}} / M_{\text{г}} - 1 ) \cdot 100 \% , \quad (1.1)$$

где:  $M_{\text{в}}$  - показание весов, кг;

$M_{\text{г}}$  - эталонная масса, кг.

Действительную массу кольцевых грузов и гирь класса  $M_1$  [34, 41, 85] с декларируемой погрешностью,  $\pm 0,001$  % нельзя обеспечить в условиях эксплуатации, а значит и нельзя обеспечить погрешность измерений массы  $\pm 0,01$  %, что объясняется отсутствием в методике весов высокого класса точности и раздела, описывающего определение действительной массы кольцевых грузов и гирь класса  $M_1$  во время эксплуатации, что в свою очередь не позволяет обеспечить достоверные измерения при калибровке и поверке ПУ.

Современная история метрологического обеспечения эталонных мерников началась с ГОСТ 8.400-80 «Мерники металлические образцовые. Методы и средства поверки» [13], который определил требования к погрешности мерников и описал методики их поверки. ГОСТ 8.400-80 [13] распространяется на образцовые мерники 1-го разряда с основной погрешностью измерений объема  $\pm 0,02$  % и мерники 2-го разряда с основной погрешностью  $\pm 0,05 \dots 0,1$  %. В качестве основных средств поверки по ГОСТ 8.400-80 [13] для образцовых мерников 1-го разряда применяются образцовые весы 3-го разряда, наборы образцовых гирь 3-го разряда, образцовые грузопоршневые весы (ОГВ) типов ОГВ-1 и ОГВ-2 для 1000 и 2000 кг соответственно с наибольшей допускаемой погрешностью  $\pm 0,01$  % измеряемой величины, лабораторные термометры с ценой деления  $0,1$  °С, погрешностью  $\pm 0,2$  °С [48]. Мерники 2-го разряда поверяются по образцовым мерникам 1-го разряда с использованием образцовых стеклянных колб 1-го разряда [13]. На практике, в большинстве случаев в качестве гирь 3-го разряда [47] применялись гири класса  $M_1$ , прошедшие поверку в аккредитованном центре стандартизации и метрологии или в государственном научно-метрологическом центре, таким образом гири класса  $M_1$  поверенные по 3-му разряду сохраняли свои метрологические характеристики (МХ) только на месте проведения поверки. После доставки комплекта гирь на место эксплуатации не все гири из комплекта соответствовали по своим МХ гилям 3-го разряда [47]. И как следствие не

обеспечивались достоверные измерения при поверке весов и эталонных мерников. Это связано с тем, что гири класса  $M_1$  [47] изготовленные из чугуна, кардинально отличаются от гирь 3-го разряда, изготовливаемых из нержавеющей стали, а кроме этого отличаются и по форме, первые гири параллелепедной формы и позволяют их устанавливать друг на друга, а вторые имеют форму, которая не допускает их установку друг на друга при наборе масс более 500 и 1000 кг. Кроме этих отличий в конструкции, комплект гирь класса  $M_1$ , требующийся для поверки весов и мерников номинальной вместимостью 1000 л, имеет стоимость в 7-8 раз меньшую, чем комплект гирь 3-го разряда ( $F_2$ ).

ГОСТ Р 8.682-2009 «Мерники металлические эталонные. Методика поверки» [27] предусматривает применение в качестве средств поверки эталонных мерников 1-го разряда весы по ГОСТ 53228-2008 [28] с погрешностью  $\pm 0,005\%$  и эталонных гирь класса точности  $F_1$  по ГОСТ 7328-2001 [14]. ГОСТ Р 8.682-2009 [27] предназначен для поверки эталонных мерников 1-го разряда с номинальной вместимостью до 1000 л с помощью весов с наибольшим пределом взвешивания (НПВ) 1500 кг. Предложенные эталонные гири класса точности  $F_1$  характеризуются пределами допускаемой относительной погрешности  $\pm 0,0005\%$ , что в сорок раз превышает предел допускаемой относительной погрешности эталонных мерников 1-го разряда  $\pm 0,02\%$ . Для обеспечения требований ГОСТ 8.021-2005 [24] по передаче размера единицы величин и выполнения требований Федерального закона №102 «Об обеспечении единства измерений» [1] для поверки эталонных мерников 1-го разряда целесообразно применить весы с погрешностью  $\pm 0,01\%$  и компараторы массы с нормированными относительными значениями СКО, гири  $M_1$ . Для этих целей подходит методика замещения массы воды в мернике массой гирь (метод сличений при помощи компаратора), где в качестве весов применить компараторы массы с относительным значением СКО не более  $0,005\%$  и комплект гирь класса точности  $F_2$  и/или  $M_1$ . Применение такой методики и средств поверки будет верно с метрологической точки зрения и экономически обосновано, что важно для Государственных метрологических центров и метрологических служб, уполномоченных на проведение Государственной поверки эталонных мерников, применяемых для средств измерений при метрологическом обеспечении учетных операций на территории РФ.

Методики поверки эталонных мерников 1-го разряда типа «М» фирмы «Seraphin test measure company» США [53, 55] предусматривают применение весов 3-го класса точности по ГОСТ 24104-2001 [20], с пределами относительной допускаемой погрешности  $\pm 0,01\%$  и наборы гирь класса  $M_1$  по ГОСТ 7328-2001 [14]. Применяемые без компараторов высокого класса точности, гири класса  $M_1$  не могут обеспечить достоверные измерения при калибровке и поверке эталонных мерников 1-го разряда по причинам, указанным выше.

Методика МИ 1972-95 «Установки поверочные трубопоршневые. Методика поверки поверочными установками на базе весов ОГВ или мерников» [49], распространяется на трубопоршневые поверочные установки 1-го и 2-го разряда всех типов, в том числе импортные, стационарного и передвижного исполнения, и устанавливает методики первичной и периодической поверок поверочными установками на базе образцовых грузопоршневых весов (ОГВ) или образцовых эталонных мерников 1-го разряда [49].

Методика определения вместимости ТПУ весами ОГВ производится при расходах, таблица 1.1.

**Таблица 1.1** Расходы при определении вместимости ТПУ весами ОГВ [49]

Пропускная способность поверяемой ТПУ(КП), м <sup>3</sup> /ч	Поверочный расход, м <sup>3</sup> /ч	
	Q <sub>п1</sub>	Q <sub>п2</sub>
100	20 - 100	10
500 и выше	100	50

Основная и наибольшая составляющая погрешности методики на базе весов ОГВ - это погрешность измерения массы. Дополнительные составляющие погрешности, влияющие на погрешность измерений объема поверяемой ПУ: погрешность измерений температуры и определения плотности рабочей жидкости, погрешность измерений времени, погрешность перекидного устройства переключения потоков (УПП).

Относительная погрешность определения плотности [2] рабочей среды  $\delta\rho$  обуславливается погрешностью каналов измерения температуры, и будет иметь наибольшее значение при температуре + 30 °С:

$$\delta\rho = \Delta_T \cdot \beta \cdot 100, \% , \quad (1.2)$$

где  $\Delta_T$  - наибольшее значение абсолютной погрешности каналов измерения температуры, °С;

$$\Delta_T = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \beta = 0,00025 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad \delta\rho = 0,2 \cdot 0,00025 \cdot 100 = 0,005 \% .$$

Мы видим, что погрешность измерения плотности при температуре + 30 °С может составлять 0,005 %, что составляет половину погрешности весов ОГВ  $\pm 0,01$  %. Значит, для обеспечения достоверных измерений необходимо изменить условия измерений при поверке до значений  $25 \pm 5$  °С

Относительные погрешности при измерении времени определяют по формуле:

$$\delta_t = (t_m / t_s - 1) \cdot 100 \% , \quad (1.3)$$

где  $t_m$  – показания на мониторе, с;

$t_s$  – показания по частотомеру, с.

Ниже приведены относительные погрешности, вносимые разновременностью срабатывания УПП.

Определение разности времени срабатывания:

$$\Delta t_i = t_{1i} - t_{2i} \quad (1.4)$$

Среднее арифметическое разности времени срабатывания:

$$\overline{\Delta t} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i}{n} \quad (1.5)$$

где  $n$  – число измерений на одном расходе.

Относительные систематические погрешности:

$$\delta_{с\ упп} = (\Delta t / t_{\min}) \cdot 100 \%, \quad (1.6)$$

где  $t_{\min}$  – минимальное время налива воды в весовой бак, с;  $t_{\min} = 30$  с.

Относительные случайные погрешности:

$$\delta_{сл\ упп} = (100 \cdot t_p / t_{\min}) \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \overline{\Delta t})^2 \right) / (n-1)}, \quad (1.7)$$

где  $t_p$  – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности  $P = 0,99$ ,  $t_p = 3,169$ .

Предельные значения относительных погрешностей УПП:

$$\delta_{упп} = \delta_{с\ упп} + \delta_{сл\ упп}. \quad (1.8)$$

Суммарная погрешность измерений массы весами ОГВ с учетом погрешностей гирь, погрешностей измерений температуры и определения плотности рабочей жидкости, погрешностями времени срабатывания перекидного устройства может достигать  $\pm 0,015\%$ , что превышает допустимое значение  $\pm 0,01\%$  и, значит требуются значительно более жесткие требования к применяемым средствам и условиям проведения измерений, а именно: необходимость применения гирь 3-го разряда, компаратора высокого класса точности, измерения температуры с погрешностью не более  $\pm 0,1\text{ }^\circ\text{C}$ , а для условий измерений - сужение диапазона температуры рабочей жидкости и температуры окружающего воздуха до значений, не превышающих  $20 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ .

Определение вместимости поверочных установок методикой на базе эталонных мерников 1-го разряда с погрешностью  $\pm 0,02\%$  производится для ТПУ при поверочных расходах воды с остановкой и без остановки поршня, приведены в таблице 1.2.

**Таблица 1.2** Поверочные расходы с остановкой и без остановки поршня [49]

Условный диаметр труб калиброванного участка, мм	$Q_{\text{наим.}}$ м <sup>3</sup> /ч	$Q_{\text{п1}}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{\text{п2}}$ , м <sup>3</sup> /ч
150	0,64	3,2 – 40	1,6 – 10
300	2,6	12 – 40	6 – 20
400	4,5	22 – 40	11 – 20
500	7,2	36 – 40	18 – 20

600	10	40 – 50	20 – 25
750	16	40 – 60	20 – 30
920	24	40 - 60	20 - 30

Во второй графе таблицы 1.2 приведены наименьшие значения расхода, с которыми шаровой поршень должен подводиться к детектору перед его остановкой. В третьей и четвертой графах приведены диапазоны значений расходов при определении объема калиброванного участка ТПУ  $Q_{п1}$  и определения протечек  $Q_{п2}$ .

Значения поверочного расхода воды при поверке КП поверочными установками на базе мерников без остановки поршня, приведены в таблице 1.3.

**Таблица 1.3** Значения поверочного расхода для КП [49]

Внутренний диаметр калиброванного участка ТПУ (компакт-прувера)		Минимальное значение расхода, м <sup>3</sup> /ч	$Q_{п1}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{п2}$ , м <sup>3</sup> /ч
8"	203,2 мм	0,055	2 – 4	1 – 2
12" мини	304,8 мм	0,224	2 - 4	1 - 2
12" стандарт	304,8 мм	0,392	2 - 4	1 - 2
18"	457,2 мм	0,784	2 - 4	1 - 2
24"	609,6 мм	1,569	4 - 8	2 - 4
40"	1016 мм	3,970	12 - 16	6 - 8

При поверке ПУ с помощью мерника основой вклад в погрешность поверочных установок вносит погрешность эталонного мерника 1-го разряда. Методика МИ 1972-95 [49] позволяет поверять поверочные установки 1-го и 2-го разряда с погрешностью  $\pm 0,05\%$  и  $\pm 0,1\%$  соответственно.



**Рис. 1.1** Поверочная установка на базе эталонных мерников

МИ 3209-2009 «Инструкция. ГСИ. Установки поверочные трубопоршневые. Методика поверки с помощью поверочной установки на базе эталонных мерников» [66]. Настоящая

методика использует для поверки набора эталонных мерников 1-го разряда с погрешностью  $\pm 0,02\%$  и вместимостью от 20 до 500 дм<sup>3</sup>, рис. 1.1. Методика позволяет выполнять калибровку и поверку ТПУ с остановкой и без остановки шарового поршня [66]. Применение набора эталонных мерников по этой методике позволяет уменьшить длительность поверки ТПУ в 2 раза по сравнению с методикой поверки на базе одного эталонного мерника.

МИ 3155-2008 [63] методика поверки ТПУ поверочными установками на базе мерника и объемного счетчика. Установки поверочные эталонные (ЭПУ) на базе мерника и объемного счетчика предназначены для воспроизведения объема жидкости и передачи единицы объема трубопоршневым поверочным установкам (ТПУ) 1-го и 2-го разряда при их калибровке и поверке с вместимостью измерительного участка от 1 до 40 м<sup>3</sup>. Принцип действия основан на сравнении объема, воспроизводимого эталонным мерником 1-го разряда, с вместимостью калиброванного участка ТПУ с помощью объемного счетчика, применяемого в качестве компаратора [63].

При проведении поверки по методике (рис. 1.2) применяют следующие основные средства поверки: мерник эталонный шкальный 1-го разряда с пределами допускаемой основной относительной погрешности  $\pm 0,02\%$  и номинальной вместимостью 500 или 1000 дм<sup>3</sup> и счетчик жидкости камерный положительного вытеснения (СЖ), предназначенный для измерений количества воды со значением среднего квадратического отклонения (СКО) случайной составляющей погрешности не более 0,015% [63].



**Рис. 1.2** Мобильная эталонная установка ООО «СНГБ» на базе мерника и объемного счетчика

Коэффициент преобразования СЖ должен обеспечивать получение не менее 10000 импульсов за время прохода шарового поршня по измерительному участку ТПУ в одном направлении и за время заполнения мерника. Рекомендуемые поверочные расходы жидкости при поверке ТПУ представлены в таблице 1.4 [63].

**Таблица 1.4** Рекомендуемые поверочные расходы жидкости для ТПУ [63]

Условный диаметр калиброванного участка, мм	Q <sub>1</sub> , м <sup>3</sup> /ч	Q <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /ч
150	3,2 – 40	1,6 – 10
300	12 – 40	6 – 20
400	22 – 40	11 – 20
500	36 – 40	18 – 20
600	40 – 50	20 – 25
750	40 – 60	20 – 30
920	40 – 60	20 – 30

Применение этой методики поверки ТПУ, основанной на базе эталонного мерника 1-го разряда и счетчика жидкости позволили обеспечить достоверные измерения при поверке ТПУ и значительно, в 4 раза уменьшить длительность поверки по сравнению с методом на базе одного эталонного мерника и в 2 раза по сравнению с методикой МИ 3209-2009 [66].

Результаты измерений, выполняемых по МИ 3155-2008 [63] подтверждены голландским институтом метрологии VSL (Нидерланды), получен СМС Certificate № 39332546 на методику поверки поверочных установок [63, 79]. Сертификат подтверждает соответствие методики и калибровочных и измерительных возможностей требованиям международных директив СИРМ MRA-D-04 и ILAC-P14:01/2013 и обеспечение измерений калиброванного объема ТПУ с неопределенностью, не превышающей 0,05 % [63, 79].

Методики поверки компакт-пруверов эталонными мерниками 1-го разряда. МИ 2000, Установка поверочная трубопоршневая малого объема SVP-2 фирмы «Smith Meter Inc» An FMC Corporation subsidiary, США, Германия, Методика поверки поверочной установкой на базе эталонных мерников 1-го разряда использует эталонные мерники 1-го разряда типа «М» с основной относительной погрешностью не более  $\pm 0,02$  % фирмы «Seraphin Test Measure Company», США [50]. МИ 2004, Установки поверочные CP, CP-M фирмы Emerson Process Management/Daniel Measurement and Control Inc США/Великобритания [55], эта методика поверки использует эталонные мерники 1-го разряда типа «М» с основной относительной погрешностью  $\pm 0,02$  % фирмы «Seraphin Test Measure Company», США. МИ 3225-2009, Установки поверочные CP, CP-M фирмы «Emerson Process Management/Daniel Measurement and Control Inc.» США, методика поверки [65] также использует эталонные мерники 1-го разряда



типа «М» с основной относительной погрешностью  $\pm 0,02 \%$  фирмы «Seraphin Test Measure Company», США. В МП 49021-12 Установки трубопоршневые Syncrotrak фирмы «Calibron Systems Inc.», США, методика поверки с помощью эталонных мерников [70] не прописана процедура взвешивания мерника. И только в МИ 3264-2010, методике поверки установок «Syncrotrak» фирмы Calibron Systems Inc.», США [68], используются эталонные мерники 1-го разряда с основной относительной погрешностью  $\pm 0,02 \%$  производства «Системы Нефть и Газ Балтия» (ООО «СНГБ») г. Калининград, РФ. В методиках поверки компакт-пруверов, использующих эталонные мерники производства США, указанные мерники по классификации ГОСТ 8.400-80 [13] не соответствуют эталонным мерникам 1-го разряда, а соответствуют требованиям мерников 2-го разряда. И только в ГОСТ 8.682-2009 [27] появился раздел, позволяющий применять мерники такой конструкции в качестве мерников 1-го разряда. Конструкция таких мерников с верхним наливом затрудняет выполнение достоверных измерений, так как в этом случае при расходах более  $10 \text{ м}^3/\text{час}$  в мернике образуются воздушные пузырьки, препятствующие полному заполнению емкости мерника при измерениях. Поэтому при расходах более  $10 \text{ м}^3/\text{час}$  рекомендуется пользоваться эталонными мерниками с нижним наливом, в этом случае обеспечивается полное, без воздушных пузырьков, заполнение объема мерника. Этим требованиям соответствуют мерники производства завода «Эталон» г. Казань и завода СНГБ г. Калининград, имеющие только нижний налив.

Среди методик поверки компакт-пруверов можно выделить МИ 2550-0163-2011 «Установки поверочные FMD» методика поверки [69], рис. 1.3. Преимущество этой методики состоит в том, что в ней использован накопленный за многие годы опыт при проведении калибровок и поверок поверочных установок КП с использованием эталонных мерников 1-го разряда и весов высокого класса точности.



**Рис. 1.3** Компакт-прувер «FMD».

Методика описывает два метода, таблица 1.5, на базе эталонного мерника 1-го разряда и на базе весов высокого класса точности. В МП 2550-0163-2011 [69] применены средства поверки из

состава установки высшей точности (УВТ) по ГОСТ 8.510 – 2002 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объема и массы жидкости» [19].

**Таблица 1.5** Метрологические характеристики основных средств поверки [69]

Средства поверки и вспомогательное оборудование	Метрологические характеристики
Первый метод	
Эталонный мерник 1-го разряда	Вместимостью от 10 до 1000 дм <sup>3</sup> , соответствующий вместимости измерительного участка поверяемой ПУ. Пределы допускаемой относительной погрешности ± 0,02 %
Расходомер	Верхний предел измерений не менее наибольшего расхода поверочной жидкости через ПУ, пределы допускаемой погрешности ± 2,5 %
Манометры	Диапазон измерений от 0 до 0,6 МПа, класс точности 0,6
Термометры ртутные стеклянные	Диапазон измерений от 0 °С до 55 °С, пределы допускаемой абсолютной погрешности ± 0,2 °С
Преобразователи избыточного давления с унифицированным выходным сигналом	Диапазон измерений от 0 до 0,6 МПа, пределы допускаемой приведенной погрешности ± 0,5 %
Термопреобразователи сопротивления с унифицированным выходным сигналом	Диапазон измерений от 0 °С до 50 °С, пределы допускаемой абсолютной погрешности ± 0,2 °С
Второй метод	
Весы электронные	Весы по ГОСТ Р 53228-2008 «Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания» с максимальной нагрузкой, соответствующей массе накопительной емкости и воды, вытесненной из измерительного участка ПУ. Пределы допускаемой абсолютной погрешности весов определяют согласно ГОСТ Р 53228 в зависимости от величины взвешиваемой массы и исходя из условия: относительная погрешность весов по абсолютной величине не должна превышать ± 0,01 %
Гири	Класс точности гирь F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub> по ГОСТ 7328-2001 «Гири. Общие технические условия»
Накопительная емкость	Вместимость накопительной емкости должна превышать вместимость поверяемых ПУ не менее, чем в 1,2 раза.
Расходомер	Верхний предел измерений не менее наибольшего расхода поверочной жидкости через ПУ, пределы допускаемой погрешности ± 2,5 %
Манометры	Диапазон измерений от 0 до 0,6 МПа, класс точности 0,6

Термометры ртутные стеклянные	Диапазон измерений от 0 °С до 55 °С, пределы допускаемой абсолютной погрешности ± 0,2 °С
Преобразователи избыточного давления с унифицированным выходным сигналом	Диапазон измерений от 0 до 0,6 МПа, пределы допускаемой приведенной погрешности ± 0,5 %
Термопреобразователи сопротивления с унифицированным выходным сигналом	Диапазон измерений от 0 °С до 50 °С, пределы допускаемой абсолютной погрешности ± 0,2 °С

Первый метод [69] описывает:

Определение вместимости ПУ при стандартных условиях, основанных на измерениях объема поверочной жидкости, вытесненной поршнем ПУ, с помощью эталонного мерника и приведения измеренного объема к стандартным условиям.

Второй метод [69] описывает:

Определение вместимости ПУ при стандартных условиях, основанных на измерениях массы поверочной жидкости, вытесненной поршнем ПУ в накопительную емкость, с помощью эталонных весов и вычисления объема поверочной жидкости при стандартных условиях по известной зависимости между массой и плотностью поверочной жидкости.

За доверительную относительную погрешность ПУ при воспроизведении объема,  $\delta_{пу}$ , %, при доверительной вероятности 0,99, принимают доверительную относительную погрешность определения вместимости ПУ при доверительной вероятности 0,99:

$$\delta_{пу} = \delta_0 \leq 0,05\% . \quad (1.9)$$

Методики поверки трубопоршневых поверочных установок 2-го разряда с применением поверочной установки 1-го разряда. МИ 2622-2000, методика поверки поверочной установкой типа «Brooks compact prover» фирмы «Brooks Instrument» США [40]; МИ 2974-2006, методика поверки трубопоршневой установкой 1-го разряда с компаратором» [49] и МИ 3268-2010 [67], методика поверки установками поверочными на базе компакт-прувера и компаратора» [57], МИ 2396-97 ГСИ. Установки поверочные трубопоршневые 2-го разряда. Методика поверки [37, 38]. Предел допускаемой относительной погрешности ТПУ или КП 1-го разряда ± 0,05 %, поверяемой 2-го разряда ± 0,1 %, СКО применяемого компаратора ± 0,02 % и ± 0,015 % [67]. Применение указанных методик обеспечивает выполнение поверки поверочных установок на месте эксплуатации только по 2-му разряду. Поверка проводится на рабочих углеводородных жидкостях.

Эталонные трубопоршневые поверочные установки 1-го разряда, рисунки 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, предназначены для измерений количества жидкости при градуировке и поверке

преобразователей объемного и массового расхода и счетчиков жидкости, трубопоршневых поверочных установок 2-го разряда на месте эксплуатации.



**Рис. 1.4** Трубопоршневая двунаправленная поверочная установка, производительность  $550\text{м}^3/\text{ч}$ , ООО «СНГБ» г. Калининград



**Рис. 1.5** Трубопоршневая двунаправленная поверочная установка с прямым калибровочным участком производительностью  $650\text{м}^3/\text{ч}$ , ООО «СНГБ» г. Калининград



**Рис. 1.6** Трубопоршневая двунаправленная поворачивающая установка производительностью 650м<sup>3</sup>/ч (конфигурация "Скорпион"), ООО «СНГБ» г. Калининград



**Рис. 1.7** Мобильная трубопоршневая двунаправленная поворачивающая установка производительностью 650м<sup>3</sup>/ч, ООО «СНГБ» г. Калининград

### 1.3 Анализ методик поверки и метрологических характеристик средств поверки

Результаты анализа применения методик и метрологических характеристик средств поверки представлены в таблице 1.6 методики и средства поверки весов и мерников, в таблице 1.7 методики и средства поверки ТПУ и КП.

**Таблица 1.6** Методики и средства поверки весов и мерников

Наименование	ГОСТ 8.400	ГОСТ 8.682	МИ 1971-95	МИ 3058-2007, МИ 3059-2007
Основные средства поверки	Весы $\pm 0,01$ %, гири $M_1$ , СИ температуры	Весы $\pm 0,005$ %, гири $F_1$ , СИ температуры	Весы $\pm 0,01$ %, набор кольцевых грузов, гири $M_1$ , СИ температуры	Весы высокого класса точности $\pm 0,01$ %, компаратор на 20 кг, набор гирь $M_1$ , гиря $F_2$ , СИ температуры
Погрешности, вносящие наибольший вклад в суммарную погрешность измерений массы и объема	Относительная погрешность определения массы гирь $M_1$ превышает $\pm 0,01$ %, погрешность плотности и измерений температуры рабочей жидкости, гири $F_1$ не используются из-за их дороговизны, отсутствие весов с погрешностью $\pm 0,005$ % с НПВ более 1000 кг			Относительная погрешность определения плотности и измерений температуры рабочей жидкости

**Таблица 1.7** Методики и средства поверки ТПУ и КП

Наименование	МИ 1972-95 [49]	МИ 2000 [50], МИ 2004 [55], МИ 3225 [65]	МП 2550 [69], МИ 3155 [63], МИ 3209 [66], МИ 3264 [68]	МИ 2622 [51], МИ 2974 [59], МИ 3268 [67]
Основные средства поверки	Весы $\pm 0,01$ %, набор кольцевых грузов, гири $M_1$ , мерники с нижним и верхним	Мерники с нижним наливом, СИ температуры	Весы высокого класса точности $\pm 0,01$ %, компаратор, набор гирь $M_1$ , гиря $F_2$ , мерники с нижним	ПУ 1-го разряда, СИ температуры

	наливом, СИ температуры		наливом, СИ температуры	
Погрешности, вносящие наибольший вклад в суммарную погрешность измерений массы и объема	Относительная погрешность определения массы и плотности рабочей среды, погрешность измерений времени, погрешность перекидного устройства переключения потоков, погрешность измерения температуры воды, погрешность мерников за счет верхнего налива	Погрешность определения вместимости мерника, погрешность измерения температуры воды	Погрешность измерения температуры воды	Погрешность измерения температуры рабочей углеводородной жидкости
Тип мерника	Налив мерника через нижний или верхний патрубок	Налив мерника через верхний патрубок	Налив мерника только через нижний патрубок	Не используется

В таблице 1.8 представлены калибровочные и измерительные возможности методики определения вместимости калиброванного участка ТПУ по МИ 3155-2008 [63] на базе эталонного мерника 1-го разряда и объемного счетчика, патент № 102995 [78] в сравнении с метрологическими характеристиками других эталонов, подтвержденные аккредитованным национальным институтом метрологии «VSL» (Нидерланды), Приложение Б.

**Таблица 1.8** Калибровочные и измерительные возможности вместимости калиброванного участка ПУ, подтвержденные сертификатом CIPM MRA, выданным НМИ «VSL» (Нидерланды) [79]

Страна, метрологическая служба предприятия	Номер сертификата, подтверждающий заявленные калибровочные и измерительные возможности (СМС)	Сертифицированный объем ПУ м <sup>3</sup> /тип ПУ	Неопределенность измерений калиброванного объема поверочной установки, %
США, фирма Cameron, г. Питтсбург	39331745	0,12 (КП) 10,0 (ТПУ) 3,3 (ТПУ)	0,03 0,04 0,07
РФ, завод СНГБ, г. Калининград	39332546	0,05...40,0 (ТПУ)	0,05
США, фирма Daniel, г. Хьюстон	39332333	60,0 (ТПУ, мастер-счетчик)	0,035...0,065

Проведенный анализ методик поверки показал, что в большинстве случаев методики и средства измерений, используемые при калибровке и поверке поверочных установок (ТПУ и КП), были разработаны больше 25-ти лет назад и не соответствуют современному техническому уровню. На метрологические характеристики этих средств измерений влияет множество факторов, снижающих точность измерений, за счет больших составляющих суммарной стандартной неопределенности, а именно из-за погрешности измерений: массы, температуры и плотности. Кроме этого эти методики требуют значительных материальных и временных затрат при их выполнении.

Основными средствами поверки в ГОСТ 8.510-2002 [19] и ГОСТ 8.142-2013 [33], определяющими показатели точности при измерениях объема и массы жидкостей [56], являются весы, эталонные мерники и эталонные поверочные установки 1-го разряда и 2-го разряда, которые передают единицу величин эталонным и рабочим преобразователям массы и объема в составе СИКН и СИКНП. Основная составляющая суммарной неопределенности измерений при передаче единицы величин определяется погрешностью измерений массы, которая и определяет размер суммарной неопределенности прослеживаемых средств измерений.

Установлено, что существующие методики и средства измерений, применяемые при калибровке и поверке эталонных мерников 1-го разряда и поверочных установок 1-го и 2-го разрядов, входящих в состав СИКН и СИКНП, требуют совершенствования и модернизации для целей обеспечения достоверных измерений массы и объема углеводородных жидкостей при учетных операциях.



Для обеспечения достоверных измерений установлена необходимость применения весов высокого класса точности с суммарной расширенной неопределенностью измерений массы не более  $\pm 0,005$  % и эталонных мерников 1-го разряда с расширенной неопределенностью измерений объема не более  $\pm 0,01$  %, измерения температуры с абсолютной погрешностью не более  $\pm 0,1$  °С, установлена необходимость разработки для этого новых методик калибровки и поверки. Современный технический уровень средств и технологий позволяет обеспечить достоверные измерения массы и объема, применив для этого средства измерений высокого класса точности.

Обеспечение достоверных измерений при учетных операциях и выполнения требований ГОСТ Р 8.682-2009 [27] требуют применения дорогостоящих гирь класса F2 и весов высокого класса точности, что в данном случае не является экономически и метрологически обоснованным, поэтому для поверки эталонных мерников 1-го разряда можно применить методику с применением компаратора и балластных грузов, обеспечивающую погрешность эталонного мерника 1-го разряда не более  $\pm 0,02$  %. По своим метрологическим характеристикам этим критериям отвечают только весы фирмы «Mettler» Швейцария, отечественных весов с такими МХ нет до настоящего времени.

#### **1.4 Выводы по главе 1**

1. Анализ существующих методик поверки весов, эталонных мерников первого разряда и поверочных установок показал, что существующие методы и средства поверки, применяемые при калибровке и поверке эталонных мерников 1-го разряда требуют совершенствования и модернизации в соответствии с задачей обеспечения достоверных измерений массы и объема углеводородных жидкостей при учетных операциях.

2. Для обеспечения достоверных измерений и решения задач импортозамещения установлена необходимость применения новых методик и высокоточных средств измерений массы с погрешностью измерений не более  $\pm 0,005$  %, а также измерений температуры с абсолютной погрешностью не более  $\pm 0,1$  °С. Для определения объема ТПУ можно применить запатентованную методику [78] на базе эталонного мерника 1-го разряда и объемного счетчика, имеющую сертификат СМС НМИ VSL [79], подтверждающий калибровочные и измерительные возможности и расчет неопределенности [80].

3. Проведенный анализ состояния метрологического обеспечения средств измерений массы и объема жидких углеводородов при учетных операциях позволил сформулировать задачи предстоящих исследований:

- провести исследования и оценить вклады неопределённости измерений при измерениях массы и объема, разработать методики измерений массы и объема углеводородных жидкостей на основе применения весов с трехкомпонентными весоизмерительными датчиками,
- разработать локальную поверочную схему для средств измерений массы и объема углеводородных жидкостей в ЗАО «Нефтегазметрология»;
- разработать поверочный комплекс ЗАО «Нефтегазметрология».

4. Во второй главе представлены этапы и результаты проведенных экспериментальных исследований, направленных на обеспечение достоверных измерений массы и объема.

## **2 Разработка и исследования методик поверки поверочных установок с применением специальных весов**

### **2.1 Исследования метрологических характеристик специальных весов по методике с применением компаратора**

Впервые метод поверки весов с применением компаратора был опробован в 1993 г. в СП «Полярное Сияние» и в 1994 г. в СП «КомиАрктикОйл» при поверке эталонных мерников 1-го разряда, предназначенных для поверки ТПУ с калиброванным объемом 500 л и 2500 л.

При поверке весов в качестве основных средств измерений были использованы: эталонная гиря массой 20 кг класса точности  $F_1$  по ГОСТ 7328-2001 [14], масс-компаратор фирмы «Сарториус» и весы платформенные KES 1500 высокого класса точности по ГОСТ 24104-2001 [20] фирмы «Меттлер Толедо». С 2002 г. стали применяться платформенные весы российской фирмы «Петвес» высокого класса точности, НПВ 1500 кг и компараторы массы ВК-20М на максимальную нагрузку 20 кг.

Разработанные автором настоящей диссертационной работы методики [53, 57, 60, 42] с применением компаратора позволили отказаться от применения гирь класса  $F_2$  и обеспечить выполнение достоверных измерений комплектом гирь  $M_1$ , полностью обеспечив выполнение требований ГОСТ 8.400-80 [13]. Весы высокого класса точности и компараторы отечественного производства фирмы «Петвес» г. Санкт-Петербург, предложенные в разработанных методиках, позволили заменить импортные весы и компараторы фирм «Меттлер Толедо» Швейцария и «Сарториус» Германия.

Описание разработанных методик заключается в поверке гирь  $M_1$  на месте эксплуатации по компаратору и присвоении им класса  $F_2$  непосредственно во время поверки эталонных мерников 1-го разряда.

Гири необходимы для проведения юстировки, поверки и испытаний весов, они делают весы средством измерений массы [89]. Разработанные методики МП 2301-0023-2006 [58], МИ 3058-2007 [60] и МИ 3059-2007 [61] позволяют обойтись без большого количества гирь класса  $F_2$ . Вместо них, в качестве балластных грузов, используются чугунные гири массой 20 кг класса  $M_1$ . Для поверки и юстировки весов используются наборы балластных грузов (гирь) соответствующей массы, каждый из которых по отдельности может быть сличен с гирей класса  $F_2$  массой 20 кг. Таким образом, каждому балластному грузу приписывается своя действительная масса на момент выполнения измерений. В соответствии с принципом аддитивности суммарная масса балластных грузов равна сумме их масс. Конечно, эти балластные грузы не обладают достаточной долговременной стабильностью. Поэтому полученные действительные значения массы балластных грузов можно применять только в процессе проводимой поверки весов,

непосредственно при калибровке и поверке в данное время и в данном месте. Таким образом, основными средствами поверки являются весы высокого класса точности, образцовая гиря массой 20 кг класса F<sub>2</sub> и компаратор массы на эту нагрузку. Данный метод применяют для юстировки и поверки весов высокого класса точности с наибольшим пределом взвешивания более 100 кг, гирь большой массы класса M<sub>1</sub> и мерников 1-го разряда. Для выполнения измерений в качестве основных средств измерений были использованы: гиря массой 20 кг класса точности F<sub>1</sub> по ГОСТ 7328-2001 [14], масс-компаратор ВК-20М ТУ4274-002-27414051-04 и весы платформенные KES-1500 высокого класса точности по ГОСТ 24104-2001 [20] фирмы «Меттлер Толедо». С 2006г. стали применяться платформенные весы фирмы «Петвес» высокого класса точности, на максимальные нагрузки 600/1500/3000кг.

При исследованиях определялись следующие метрологические характеристики весов НПВ 600/1500/3000 кг: погрешность при центрально-симметричном расположении груза, погрешность при нецентральной позиции груза, размах результатов измерений, погрешность весов после выборки массы тары, порог чувствительности весов [28, 61, 62].

Перед началом поверки весов их выдерживают при постоянной температуре в месте проведения поверки не менее 4 часов. Весовой компаратор юстируют с помощью гири массой 20 кг класса точности F<sub>1</sub> согласно руководству по эксплуатации весов. Перед проведением поверки весов следует поверить комплект балластных грузов суммарной массой, равной НПВ поверяемых весов. Поверку проводят на масс-компараторе методом сличения с гирей массой 20 кг класса точности F<sub>1</sub> по схеме «АВА» в соответствии с [47, 62]. Для каждой гири, входящий в комплект определяем ее действительное значение по формуле:

$$m_B = m_A + I_B - \frac{(I_{A1} + I_{A2})}{2}, \quad (2.1)$$

где  $m_B$  и  $m_A$  - действительные значения массы калибруемой и эталонной гири;

$I_B$  - показания компаратора для калибруемой гири;

$I_{A1}$  и  $I_{A2}$  - показания компаратора для эталонной гири при первом и последнем измерениях по схеме «АВА».

## 2.2 Исследования метрологических характеристик эталонного мерника

Для определения показателей точности использовались основные средства измерений: эталонная гиря 2-го разряда массой 20 кг (гиря класса точности F<sub>1</sub>) по ГОСТ 7328-2001 [14], масс-компаратор ВК-20М, весы платформенные высокого класса точности по ГОСТ 24104-2001 [20] с НПВ, соответствующим массе заполненного мерника, комплект гирь параллелепипедной формы массой 20 кг класса точности M<sub>1</sub> и гирь массой 0,5; 5 и 10 кг класса точности F<sub>2</sub> по ГОСТ 7328-2001 [14].

Мерник необходимо подготовить в соответствии с требованиями п.2.2 [14]. Масс-компаратор ВК-20М необходимо поверить с помощью гири массой 20 кг класса точности F<sub>1</sub> по ГОСТ 7823-2001 [14] в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации.

Перед проведением поверки мерника следует поверить комплект гирь класса точности M<sub>1</sub> суммарной массой, близкой к массе воды в мернике. Поверки следует проводить на масс-компараторе ВК-20М методом сличения с гирей массой 20 кг класса точности F<sub>1</sub> по схеме «АВА» в соответствии с [47]. Для каждой гири, входящий в комплект следует определить ее действительное значение.

Проведение измерений. На платформенные весы устанавливают предварительно смоченный мерник, с помощью устройства выборки массы тары устанавливают нулевые показания весов и заполняют мерник дистиллированной водой до отметки номинальной вместимости. Записывают показания весов  $I_m$ , кг и измеряют температуру воды в мернике  $t$ , °С. После этого воду сливают, после полного опорожнения мерника дают выдержку на слив капель в течение 1 минуты. Затем устанавливают на весы гири, общей массой близкой к измеренному значению  $I_m$  и кратного 20 кг, записывают показания весов. Определяют поправку [60] к показаниям весов по формуле:

$$\Delta I = (m_w - I_w) \frac{I_m}{I_w}, \quad (2.2)$$

где  $m_w$  - масса установленных на весы гирь.

Результат взвешивания воды в заполненном до номинальной отметки мерника [60] получают по формуле:

$$m = I_m + \Delta I. \quad (2.3)$$

Вместимость мерника  $V_t$  в дм<sup>3</sup> [27, 60] определяют по формуле:

$$V_t = p \cdot m, \quad (2.4)$$

где  $p$  – коэффициент, учитывающий значение плотности дистиллированной воды и поправку на действие выталкивающей силы воздуха. Численные значения коэффициента  $p$  приведены в справочном приложении используемых источников [13, 14].

Вместимость мерника  $V_{20}$  при 20 °С [27, 60] вычисляют по формуле:

$$V_{20} = n \cdot V_t, \quad (2.5)$$

где  $n$  - коэффициент, учитывающий изменение объема мерника от температуры в зависимости от материала, из которого он изготовлен.

Численные значения коэффициента  $n$  приведены в справочном приложении используемых источников [13, 14]. Вместимость поверяемого мерника определяют два раза. При этом относительная разность между результатами измерений не должна превышать  $\pm 0,01$  %, а относительные разности между каждым из этих результатов и номинальным значением

вместимости не должны превышать 0,01 % [60]. За действительное значение вместимости поверяемого мерника принимают среднее арифметическое из двух результатов измерений и за абсолютную погрешность поверяемого мерника принимают разность между номинальным значением вместимости мерника и его действительным значением [60].

Последующие применения этого метода в ООО «Северная нефть», ООО «Лукойл», ОАО «АК «Транснефть», ОАО «Роснефть» и других нефтяных компаниях, подтвердили правильность выбранного метода, простоту применения для целей обеспечения достоверных измерений при определении вместимости эталонных мерников 1-го разряда на месте эксплуатации. Метод с компаратором позволил отказаться от комплекта из 75 штук дорогих гирь класса F<sub>2</sub>. Комплект гирь M1 массой 1500 кг не всегда позволял оперативно проводить калибровку и поверку эталонных мерников 1-го разряда на месте эксплуатации в связи со значительной удаленностью СИКН и СИКНП от территориальных центров метрологии.

### **2.3 Исследования метрологических характеристик специальных весов по методике без применения компаратора**

В обычных весах с несколькими датчиками, сигналы с каждого из них суммируются и суммарный сигнал выводится на дисплей. Такие весы характеризуются одним суммарным коэффициентом преобразования. При этом информация об индивидуальных свойствах датчиков теряется и не может быть учтена в дальнейшем. Коэффициент преобразования весов такого типа находят нагружением весов эталонными гирями. В простейшем случае он представляет собой частное от деления изменения сигнала  $\Delta I$  на приращение нагрузки от нуля до массы эталонной гири, т.е.

$$k = \frac{\Delta I}{m_r} \quad , \quad (2.6)$$

где  $k$  – коэффициент преобразования весов;

$m_r$  – масса эталонной гири.

При этом с ростом верхнего предела взвешивания весов требуются все большее количество эталонных гирь. Эти гири должны быть доставлены на место их эксплуатации или на место их поверки. Основную долю затрат на эксплуатацию таких весов, применяемых для поверки эталонных мерников 1-го разряда, составляет стоимость гирь класса F<sub>2</sub>, которая может достигать около 7 млн. рублей. Кроме этого на практике часто бывает сложно обеспечить доставку 1500 кг гирь на поверку.

Для обеспечения достоверных измерений и снижения стоимости затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание были предложены специальные весы с независимыми трехкомпонентными датчиками, снабженными тремя тензорезисторными мостами, чувствительными вдоль вертикальной оси Z по действию измеряемой нагрузки и к боковым

горизонтальным составляющим, вдоль осей  $X$  и  $Y$ . Причем информация о составляющих нагрузки выводится на дисплей с каждого датчика, что дает возможность минимизировать боковые составляющие с записью их значений в соответствующем протоколе. После этого датчики можно снять с весов и отвезти их в поверку в аккредитованном на поверку метрологическом центре испытаний средств измерений с помощью эталонных силовоспроизводящих машин 1-го разряда (эталонных гирь) с пределом допускаемой относительной погрешности не более  $\leq \pm 0,002 \%$  для обеспечения требований ГОСТ Р 8.663-2009 [26] для весов, применяемых для поверки эталонных мерников 1-го разряда. После поверки датчики устанавливаются в весы и юстируются с учетом полученных ранее значений боковых составляющих при нагружении выбранной юстировочной массой. Юстировку проводят на месте эксплуатации весов с учетом значений ускорения свободного падения в местах эксплуатации и поверки весов. Эталонная масса  $m_r$ , с которой сравнивают показания весов, рассчитывают по формуле:

$$m_r = F_r / g_V \quad , \quad (2.7)$$

где  $F_r$  - значение силы в Н, воспроизводимое рабочим эталонно единицы силы;

$g_V$  - ускорение свободного падения на месте поверки датчика.

Тогда значение эталонной массы на месте эксплуатации  $m_{er}$  рассчитывают по формуле

$$m_{er} = m_r \cdot \frac{g_r}{g_e} \quad , \quad (2.8)$$

где  $g_e$  - ускорение свободного падения на месте эксплуатации датчика.

Весы с нагрузками менее 300 кг можно поверять с помощью эталонных гирь. В этом случае доставка эталонных гирь к месту эксплуатации не вызывает затруднений и целесообразно использовать в весах обычные однокомпонентные весоизмерительные датчики. В этом случае предлагается определять коэффициенты преобразования каждого отдельного датчика путем нагружения весов эталонной гирей, перемещая ее по платформе весов и, каждый раз снимая показания с каждого датчика. Если число таких измерений превышает число датчиков в весах, то мы получаем избыточную систему уравнений измерений, из которой методом наименьших квадратов находим оценки коэффициентов преобразования датчиков и их неопределенности [35].

В весах применены трехкомпонентные весоизмерительные датчики (рис. 2.1), которые преобразуют приложенную к ним силу, в данном случае вес нагрузки, по трем координатным осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  в соответствующие электрические сигналы.

Выходной сигнал по компоненте вектора силы вдоль вертикальной оси  $Z$  пропорционален массе измеряемой нагрузки, а сигналы по компонентам вектора силы вдоль осей  $X$ ,  $Y$  в горизонтальной плоскости пропорциональны боковым составляющим вектора силы приложенной нагрузке. В идеальном случае они должны быть близки к нулю. Тогда вектор силы от измеряемой нагрузке совпадает с компонентой вдоль оси  $Z$ :

$$F_l = F_z \quad . \quad (2.9)$$



**Рис. 2.1** Трехкомпонентный весоизмерительный датчик

Сигналы по компонентам вектора силы вдоль осей X, Y служат для контроля правильности юстировки датчиков. Градуировку датчиков по измерительному каналу (по оси Z) проводят на эталонной установке прямого нагружения. При этом фиксируют сигналы  $U_{cx}$  и  $U_{cy}$  по каналам X и Y. При появлении сигналов вдоль осей X, Y более 3 грамм, измерения производятся с учетом этих нагрузок.

Для определения коэффициентов преобразования весоизмерительных датчиков специальных весов и их неопределенностей выполняют следующие процедуры: освобождают платформу весов и после успокоения нажатием клавиши «Т» тарируют показания весов на ноль. На платформу весов устанавливают эталонную гирю (комплект гирь) массой 500 кг, соответствующей первой испытательной нагрузке  $m_1$ . Протокол определения коэффициентов и погрешности весов ВСПМ-1500 при нагрузках 500 и 1000 кг приведен в Приложении А. Эталонную гирю устанавливают по возможности симметрично относительно центра грузоприемной платформы и после успокоения записывают показания весов с каждого датчика  $I_{11}$ ,  $I_{12}$ ,  $I_{13}$  затем при той же нагрузке на весы производят перемещение части гирь в сторону первого датчика и после успокоения снимают показания весов с каждого датчика, далее производят перераспределение нагрузки в сторону второго датчика и после успокоения снимают показания весов с каждого датчика, затем перераспределяют нагрузку на третий датчик и после



успокоения снимают показания с каждого датчика. На этом заканчивается первый цикл измерений. Таких циклов следует провести не менее трех. В результате заполняют таблицу, которую записывают в виде прямоугольной матрицы  $A1$  размером  $(n \times 3+1)$ , где  $n$  – число циклов измерений.

Затем освобождают грузоприемную платформу и снова тарируют весы на ноль.

После этого повторяют все операции со второй нагрузкой 1000 кг и получают матрицу  $A2$ . Затем повторяют все операции с третьей нагрузкой 1500 кг и получают матрицу  $A3$ . В результате получают для каждой нагрузки свою матрицу показаний  $A1$ ,  $A2$  и  $A3$ .

Систему уравнений измерений в матричной форме записывают в следующем виде:

$$m = A \cdot k \quad , \quad (2.10)$$

где  $m$  - вектор масс измеряемых грузов;

$k$  - вектор коэффициентов преобразования датчиков.

Коэффициенты преобразования датчиков  $k1$ ,  $k2$  и  $k3$  методом наименьших квадратов (Приложение А) по формуле:

$$k = L \cdot m \quad , \quad (2.11)$$

$$L = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \quad , \quad (2.12)$$

где  $k = \begin{pmatrix} k1 \\ k2 \\ k3 \end{pmatrix}$  – искомый вектор коэффициентов преобразования датчиков;

$A^T$  - транспонированная матрица  $A$ ;

$m$  – вектор, все компоненты которого равны одной из испытательных нагрузок.

Подставляя полученное решение для вектора  $k$  в систему уравнений измерений (2.11), получим вектор остаточных погрешностей  $\Delta$ , равный:

$$\Delta = A \cdot k - m, \quad (2.13)$$

Вариационно-ковариационную матрицу [39] находят по формуле:

$$VA = (A^T \cdot A)^{-1} \quad . \quad (2.14)$$

Неопределенность вектора коэффициента преобразования  $k$  по типу А вычисляют по формуле

$$u_A = S \cdot \sqrt{Diag(VA)} \quad . \quad (2.15)$$

Измерения проводят не менее, чем при двух испытательных нагрузках.

Вектор неопределенности вектора коэффициента преобразования  $k$  по типу В вычисляют по формуле:

$$u_B = L \cdot u_w \quad . \quad (2.16)$$

Суммарную стандартную неопределенность вектора коэффициента преобразования [71] рассчитывают по формуле:

$$\mathbf{u}_c(\mathbf{k}) = \sqrt{\mathbf{u}_A^2 + \mathbf{u}_B^2} \quad , \quad (2.17)$$

Расширенную неопределенность вектора коэффициента преобразования рассчитывают по формуле:

$$\mathbf{U}(\mathbf{k}) = 2\mathbf{u}_c(\mathbf{k}) \quad . \quad (2.18)$$

Показания датчиков весов с тремя независимыми датчиками, представленные в виде матрицы  $\mathbf{A}$ , можно представить как компоненты некоторого вектора  $\mathbf{Z}$  ( $Z_1, Z_2, Z_3$ ). Очевидно его длина пропорциональна приложенной нагрузке, а его направление от нее не зависит и является инвариантом для данной конфигурации весов. Направление нагрузки зависит от соотношения коэффициентов преобразования весов, которое проявляется при смещении нагрузки, приложенной к весам, по платформе. Предельные значения углов  $\alpha$  и  $\beta$ , определяющих направление вектора  $\mathbf{Z}$ , могут служить оценкой состояния весов и быть критерием, когда их следует настроить и провести очередную поверку. В таблице 2.1 представлены результаты определения углов вектора  $\mathbf{Z}$ , определяющих его направление при различных нагрузках, для специальных весов ВСПМ-1500 ЗАО «Нефтегазметрология», г. Белгород.

**Таблица 2.1** Результаты определения углов вектора  $\mathbf{Z}$

Нагрузка, кг	$\alpha_{\text{ср}}$ , град.	$\Delta\alpha$ , град	$\beta_{\text{ср}}$ , град	$\Delta\beta$ , град	Число измерений, N
320	35,1	$\pm 10,5$	41,8	$\pm 6,9$	13
1320	35.9	$\pm 6.6$	47,4	$\pm 6,5$	13
452	35.6	$\pm 0,5$	48.9	$\pm 0.6$	9
1452	35.6	$\pm 0,6$	45.5	$\pm 0.6$	9

Границы угла  $\alpha$  и угла  $\beta$ , внутри которых можно считать рабочее состояние весов, удовлетворяющим требованиям технической документации, рассчитывают для нижней границы по формуле:

$$\alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{min}} - \Delta\alpha_{\text{max}} = 24,6 \text{ град.} \quad (2.19)$$

И для верхней границы по формуле:

$$\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{max}} + \Delta\alpha_{\text{max}} = 42,5 \text{ град.} \quad (2.20)$$

В процессе эксплуатации весов контролируют направление вектора путем нагружения весов некоторой массой, для чего можно использовать пустой эталонный мерник. Если направление вектора выходит за пределы указанных границ, следует принять решение о проведении юстировки и последующей поверке [47, 71].

Результаты экспериментальных исследований весов ВСПМ-1500 при нагрузках 320 и 1320 кг приведены в Приложении В.

Показания весов и значения остаточных погрешностей приведены в таблице 2.2.

**Таблица 2.2** Показания весов и значения остаточных погрешностей

№ п/п	Нагрузка 320 кг		Нагрузка 1320 кг	
	Показание, кг	Погрешность, кг	Показание, кг	Погрешность, кг
1	319.992	-0.014	1320.017	-0.009
2	320	-0.006	1319.979	-0.047
3	320.006	-0.001	1320.017	-0.009
4	320.028	0.022	1320.05	0.023
5	320.02	0.014	1320.058	0.032
6	320.014	0.008	1320.017	-0.009
7	319.978	-0.028	1319.984	-0.043
8	320.005	-0.001	1319.992	-0.034
9	320.016	0.010	1320.051	0.024
10	320.025	0.019	1320.017	-0.009
11	319.987	-0.019	1320.069	0.043
12	320.004	-0.002	1320.056	0.029
13	320.005	-0.001	1320.035	0.008
Среднее	320.006	0	1320.0264	0
СКО, кг	0.015		0.025	

Значения коэффициентов преобразования датчиков при двух испытательных нагрузках приведены в таблице 2.3.

**Таблица 2.3** Значения коэффициентов преобразования датчиков при двух испытательных нагрузках

№ п/п	Нагрузка, кг	
	320	1320
К1, кг/ед	0.003013	0.003009
К2, кг/ед	0.002996	0.003007
К3, кг/ед	0.002997	0.002996

Погрешности весов при двух нагрузках приведены в таблице 2.4.

**Таблица 2.4** Погрешности весов при двух нагрузках

№ п/п	Показатель точности	Полученное значение показателя точности при нагрузке, кг (%)

		320	1320
1	Случайная составляющая погрешности, кг	0,015 (0,0047)	0,025 (0,0019)
2	Неисключенная систематическая погрешность, кг	0*	0*
3	Доверительные границы суммарной погрешности при доверительной вероятности 0,95	0.029 (0,0091)	0,050 (0,0038)
4	Расширенная неопределённость результата единичного измерения (при $k=2$ )	0.029 (0,0091)	0,050 (0,0038)

\*Пренебрежимо малая величина

#### 2.4 Исследования метрологических характеристик эталонного мерника по методике без применения компаратора

Результаты проведенных исследований подтвердили высокую точность специальных весов ВСПМ-1500 (рис 2.2), выполненных на базе трехкомпонентных весоизмерительных датчиков. Расширенная неопределенность весов составила  $\pm 0,004$  % при доверительной вероятности  $P = 0,95$ , что в 2,5 раза лучше расширенной неопределенности измерений, получаемой с помощью применяемых в настоящее время весов для поверки эталонных мерников 1-го разряда.



Рис. 2.2 Определение вместимости мерника на весах ВСПМ-1500

По этой причине весы ВСПМ-1500 могут быть введены в состав исходного эталона единицы массы и объема жидкости.

При проведении поверки мерников 1-го разряда в соответствии с данной методикой должны быть выполнены следующие операции:

- определение массы пустого и заполненного дистиллированной водой мерника;
- определение действительного значения вместимости мерника;
- определение массы воды в горловине;
- определение вместимости горловины и цены деления шкалы мерника;
- определение погрешности и расширенной неопределенности вместимости мерника;
- определение расширенной неопределенности вместимости горловины мерника.

Вместимость до номинальной отметки шкалы мерника в соответствии с предложенной методикой определяют методом замещения массы воды массой эталонных гирь. Массу воды в мернике, заполненного до отметки номинальной вместимости, сличают с эталонными гирями на весах специальных ВСПМ высокого класса точности с относительным значением СКО не более 0,0025 %.

Мерник устанавливают по уровню на платформе весов, показания весов устанавливают на нуль, нажатием кнопки «Т» на сенсорном дисплее. Через впускной кран мерник заполняют дистиллированной водой до отметки номинальной вместимости. По истечении 10 минут, измеряют и регистрируют температуру воды в термокарманах  $t_1$  и  $t_2$ , принимая температуру мерника равной среднему арифметическому  $\bar{t}$  из двух измеренных значений  $t_1$  и  $t_2$ . Регистрируют показания весов  $I_m$ . Сливают воду из мерника сплошной струей, дают выдержку на слив капель в течение 60 с и снимают мерник с платформы весов [13, 60].

Затем устанавливают на весы имитатор пустого мерника, показания весов устанавливают на нуль, нажатием кнопки «Т» на сенсорном дисплее и затем на имитатор устанавливают гири, замещающие массу воды, общей массой,  $m_w$ , близкой к измеренному значению  $I_m$ , и регистрируют показания весов  $I_w$  [13, 60].

Определение вместимости мерника определяют не менее двух раз. Расхождение между двумя полученными значениями не должно превышать 0.01 %. За действительное значение вместимости принимают среднее арифметическое из двух значений его вместимости [13, 60].

Вместимость горловины мерника по шкале мерника на любой точке отметки шкалы определяют как сумму (разность – для отметок, расположенных ниже отметки номинальной вместимости) номинальной вместимости мерника и вместимости его горловины от отметки номинальной вместимости до выбранной отметки [13, 60].

Заполняют мерник водой выше максимальной верхней отметки шкалы. После 10 минут выдержки измеряют температуру воды в мернике и регистрируют температуру, принимая температуру мерника равной температуре воды. Устанавливают на весы смоченную вспомогательную емкость. При наличии у весов функции обнуления, показания весов устанавливают на «0». Сливают (отбирают) воду из мерника во вспомогательную емкость до уровня минимальной нижней отметки шкалы. Наполненный сосуд устанавливают на весы, взвешивают и регистрируют значение массы воды во вспомогательной емкости, взвешивание проводят с выполнением условий по изменению температуры воды и воздуха. Сливают воду из вспомогательной емкости [13, 60].

Вместимость между крайними отметками шкалы определяют не менее двух раз. При этом относительная разность между результатами измерений не должна превышать 0,01 % [27, 60].

Определение цены деления шкалы. Полученные при измерениях вместимости шкалы значения массы воды, переводят в значения объема, при температуре 20 °С. Цену деления шкалы горловины определяют как частное от деления вместимости горловины на число делений. Обработку результатов измерений проводят по алгоритму обработки результатов вместимости мерника, приведенному ниже [27, 60].

Вместимость эталонного мерника определяют весовым методом в соответствии с уравнением измерений:

$$V_{20} = m_W(\rho_W - \rho_a) \frac{I_m[1 - (t-20)\beta]}{I_W \rho_W(\rho_t - \rho_a)}, \quad (2.21)$$

где  $V_{20}$  – вместимость мерника при температуре 20 °С;

$m_W$  – масса гирь, замещающих массу воды в мернике;

$\rho_W$  – плотность гирь;

$\rho_a$  – плотность окружающего воздуха;

$I_m$  – разность показаний весов с заполненным водой мерником и пустым мерником (соответствующей массе воды в мернике);

$t$  – температура воды в мернике;

$\beta$  – объемный коэффициент температурного расширения мерника;

$I_W$  – показание весов с гирями, замещающими массу воды в мернике;

$\rho_t$  – плотность воды при температуре  $t$ .

Результаты экспериментальных исследований мерников 20 дм<sup>3</sup> и 1000 дм<sup>3</sup> приведены в Приложении Г.

Действительное значение вместимости горловины мерника на максимальной верхней отметке шкалы при 20 °С рассчитывают по формуле:

$$V_{+N}^{20} = \frac{I_{+N}}{(\rho_w^t - \rho_a^t)} \left[ 1 - \frac{2}{3} \beta (t - 20) \right] \quad (2.22)$$

Действительное значение вместимости горловины мерника на минимальной нижней отметке шкалы при 20 °С рассчитывают по формуле:

$$V_{-N}^{20} = \frac{I_{-N}}{(\rho_w^t - \rho_a^t)} \left[ 1 - \frac{2}{3} \beta (t - 20) \right] \quad (2.23)$$

Результаты измерений входных величин, значения констант и их пределы допускаемой абсолютной погрешности мерника № 012 вместимостью 1000 дм<sup>3</sup> приведены в таблице 2.5.

**Таблица 2.5** Результаты измерений входных величин

№ п/п	Входная величина	Численное значение	Пределы допускаемой абсолютной погрешности	Стандартная неопределенность
1	$\beta, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	0,0000477	$\pm 0,0000001$	0,00000003
2	$\rho_a, \text{ кг м}^{-3}$	1.195	$\pm 0,0001$	0,00003
3	$\rho_w, \text{ кг м}^{-3}$	8000	$\pm 0,5$	0,8
4	$I_m, \text{ кг}$	996.363	$\pm 0,01$	0,029
5	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	20,98	$\pm 0,1$	0,04
6	$\rho_t, \text{ кг м}^{-3}$	997.988	$\pm 0,003$	0,001
7	$I_w, \text{ кг}$	999.38	$\pm 0,01$	0,03
8	$m_w, \text{ кг}$	1000,0209	$\pm 0,018$	0,006

Измеряют и регистрируют температуру воды в термокарманах  $t_1$  и  $t_2$ , принимая температуру воды в мернике, равной среднему арифметическому  $\bar{t}$  из двух измеренных значений  $t_1$  и  $t_2$ . Далее регистрируют показание весов  $I_m$ . Сливают воду из мерника сплошной струей, дают выдержку на слив капель в течение 60 с и снимают мерник с платформы весов.

Стандартную неопределенность результата измерений средней температуры [13, 60] в мернике  $u_t$  можно оценить по формуле:

$$u_t = \sqrt{2 \cdot \left( \frac{\Delta t}{2 \cdot \sqrt{3}} \right)^2} \quad (2.24)$$

где  $\Delta t$  – предел допускаемой абсолютной погрешности термометров.

Оцениваем суммарную стандартную неопределенность результата измерений средней температуры в мернике как  $u_t = 0,04 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Плотность воздуха рассчитывают по формуле:

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot P_a - 0,009024 \cdot (hr) \cdot e^{0,0612t_a}}{273,15 + t_a} \quad (2.25)$$

Определение погрешности и неопределенности вместимости мерника  $\Delta V$  находят как разность между его действительным и номинальным значениями:

$$\Delta V = V_{20} - V_{nom} \quad (2.26)$$

Вместимость мерника  $V_N$  при 20 °С на  $N$ -ой отметке шкалы находят по формуле:

$$V_N = V_{20} \pm \frac{N}{N_{max}} V_{\pm N}^{20} . \quad (2.27)$$

В формуле (2.27) применять знак «+» для отметок шкалы выше нулевой отметки, знак «-» - для отметок шкалы ниже номинальной отметки.

Суммарную стандартную неопределенность измерений плотности воздуха [28, 29, 72] рассчитывают по формуле:

$$u(\rho_a) = \sqrt{u_F^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial P_a} \cdot u_{Pa}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial t_a} \cdot u_{ta}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} \cdot u_{hr}\right)^2} . \quad (2.28)$$

$$u_F = 10^{-4} \rho_a;$$

Коэффициенты влияния в при условиях калибровки имеют следующие численные значения:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial P_a} = 10^{-5} \rho_a \text{ Па}^{-1}; \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t_a} = -3,4 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1} \rho_a; \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} = -10^{-4} \rho_a . \quad (2.31)$$

Суммарную стандартную неопределенность измерений плотности воды рассчитывают по формуле [72]:

$$u_\rho = \sqrt{u(\rho)_{tab}^2 + (\rho_w^t \cdot \beta_w \cdot u_t)^2} . \quad (2.32)$$

Суммарную стандартную неопределенность измерений вместимости мерника [72] на номинальной отметке шкалы рассчитывают по формуле:

$$u_c(V_{20}) = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{20}}{\partial m_W} u_{mW}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_W} u_{\rho W}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_a} u_{\rho a}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial I_m} u_{Im}\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial t} u_t\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \beta} u_\beta\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial I_W} u_{IW}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_t} u_{\rho t}\right)^2} \quad (2.33)$$

Частные производные, входящие в (2.33), представляют собой коэффициенты чувствительности:

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial m_W} = - \frac{I_m(\rho_a - \rho_W)[\beta(t-20)-1]}{I_W \rho_W(\rho_a - \rho_t)} ; \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_W} = - \frac{I_m m_W \rho_a (20\beta - t\beta + 1)}{I_W \rho_W^2 (\rho_a - \rho_t)} ; \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_a} = \frac{I_m m_W (\rho_W - \rho_t)(20\beta - t\beta + 1)}{I_W \rho_W (\rho_a - \rho_t)^2} ; \quad (2.36)$$



$$\frac{\partial V_{20}}{\partial I_m} = - \frac{m_W(\rho_a - \rho_W)[\beta(t-20)-1]}{I_W \rho_W(\rho_a - \rho_t)}; \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial t} = - \frac{I_m \beta m_W(\rho_a - \rho_W)}{I_W \rho_W(\rho_a - \rho_t)}; \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial \beta} = - \frac{I_m m_W(\rho_a - \rho_W)(t-20)}{I_W \rho_W(\rho_a - \rho_t)}; \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial I_W} = \frac{I_m m_W(\rho_a - \rho_W)[\beta(t-20)-1]}{I_W^2 \rho_W(\rho_a - \rho_t)}; \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_t} = - \frac{I_m m_W(\rho_a - \rho_W)[\beta(t-20)-1]}{I_W \rho_W(\rho_a - \rho_t)}. \quad (2.41)$$

Вместимость горловины от минимальной нижней до максимальной верхней отметок рассчитывают по формуле:

$$V_g = V_{+N}^{20} + V_{-N}^{20}. \quad (2.42)$$

Функциональная зависимость для вместимости горловины:

$$V_g = \frac{I_\Sigma}{(\rho_W^t - \rho_a^t)} \left[ 1 - \frac{2\beta(t-20)}{3} \right]. \quad (2.43)$$

Здесь  $I_\Sigma = I_{+N} + I_{-N}$ . (2.44)

Расширенную неопределенность вместимости мерника [72] на номинальной отметке для уровня доверия 0,95 для нормального закона распределения (коэффициент охвата равен 2) вычисляют по формуле [72]:

$$U_{0,95}(V_{20}) = 2u_c. \quad (2.45)$$

Доверительные границы абсолютной погрешности при доверительной вероятности 0.95 рассчитывают по формуле [72]:

$$\delta = 2u_c. \quad (2.46)$$

В таблице 2.6 представлены результаты измерений горловины мерника № 022/1.

**Таблица 2.6** Бюджет неопределенности горловины мерника [46]

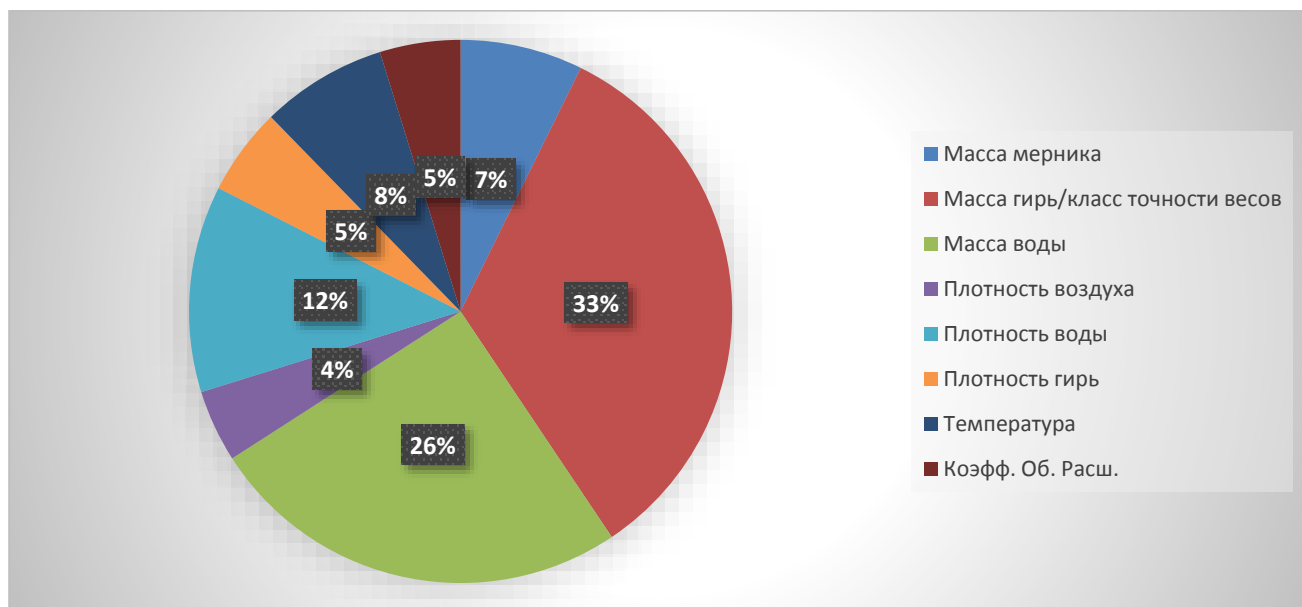
Вместимость горловины					
$I_\Sigma$	19,930 кг	0,001 кг	Равномерное	$0,001 \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
$\rho N_W^t$	996,849 кг м <sup>-3</sup>	0,008 кг м <sup>-3</sup>	То же	$2,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{ кг м}^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
$\rho N_a^t$	1,16501 кг м <sup>-3</sup>	$6 \cdot 10^{-5}$ кг м <sup>-3</sup>	То же	$2,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{ кг м}^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
$t$	25,76 °C	0,06 °C	То же	$7,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \text{ °C}^{-1}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$
$B$	$0,0000537 \text{ °C}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-1}$	То же	$0,076 \text{ м}^3 \text{ °C}^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-6}$
$V_g$	$0,020 \text{ м}^3$			$u_c(V_g)$	$1,0 \cdot 10^{-3}$

Бюджет неопределенности мерника № 022/1 вместимостью 1000 дм<sup>3</sup> представлен в таблице 2.7 и на рисунке 2.3.

**Таблица 2.7** Бюджет неопределенности поверки мерника [46, 72]

Параметр	Оценка	Стандартная неопределенность	Распределение вероятностей	Коэффициент чувствительности	Вклад, дм <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6
Вместимость на номинальной отметке					
1	2	3	4	5	6
$m_W$	1000,0037 кг	0,003 кг	Равномерное	0,001 м <sup>3</sup> кг <sup>-1</sup>	3,0·10 <sup>-3</sup>
$I_m$	997,18 кг	0,029 кг	То же	0,001 м <sup>3</sup> кг <sup>-1</sup>	2,9·10 <sup>-2</sup>
$I_W$	1000,36 кг	0,021 кг	То же	0,001 м <sup>3</sup> кг <sup>-1</sup>	2,1·10 <sup>-2</sup>
$\rho_a^t$	1.165152 кг м <sup>-3</sup>	6·10 <sup>-5</sup> кг м <sup>-3</sup>	То же	8,8·10 <sup>-4</sup> м <sup>3</sup> / кг м <sup>-3</sup>	5,3·10 <sup>-5</sup>
$\rho_w^t$	996,8640 кг м <sup>-3</sup>	0,008 кг м <sup>-3</sup>	То же	0,001 м <sup>3</sup> / кг м <sup>-3</sup>	8,0·10 <sup>-3</sup>
$\rho_w$	8000 кг м <sup>-3</sup>	50 кг м <sup>-3</sup>	То же	1,8·10 <sup>-8</sup> м <sup>3</sup> / кг м <sup>-3</sup>	9,1·10 <sup>-4</sup>
$t$	25,68 °С	0,06 °С	То же	5,4·10 <sup>-5</sup> м <sup>3</sup> °С <sup>-1</sup>	3,2·10 <sup>-3</sup>
$B$	0.0000537 °С <sup>-1</sup>	1·10 <sup>-7</sup> °С <sup>-1</sup>	То же	5,69 м <sup>3</sup> °С	5,7·10 <sup>-4</sup>
$V_{20}$	1,00068 м <sup>3</sup>			$u_c(V_{20}) =$	3,7·10 <sup>-2</sup>

На представленном рисунке 2.3 видно, что наибольший вклад в суммарную неопределенность при определении объема вносит измерение массы, составляющее 66%. Следующими по значимости стоят измерения температуры, составляющие 12% и плотности воды 8%.



**Рис. 2.3** Бюджет неопределенности измерений вместимости мерника 1000 дм<sup>3</sup>

Расширенная неопределенность вместимости мерника (при  $k = 2$ ) [46, 72]:

$$U_{0,95}(V_{20}) = 2u_c = 2 \cdot 0,037 = 0,074 \text{ дм}^3, \quad (2.47)$$

$$W(V_{20}) = 0,0074 \% \quad . \quad (2.48)$$

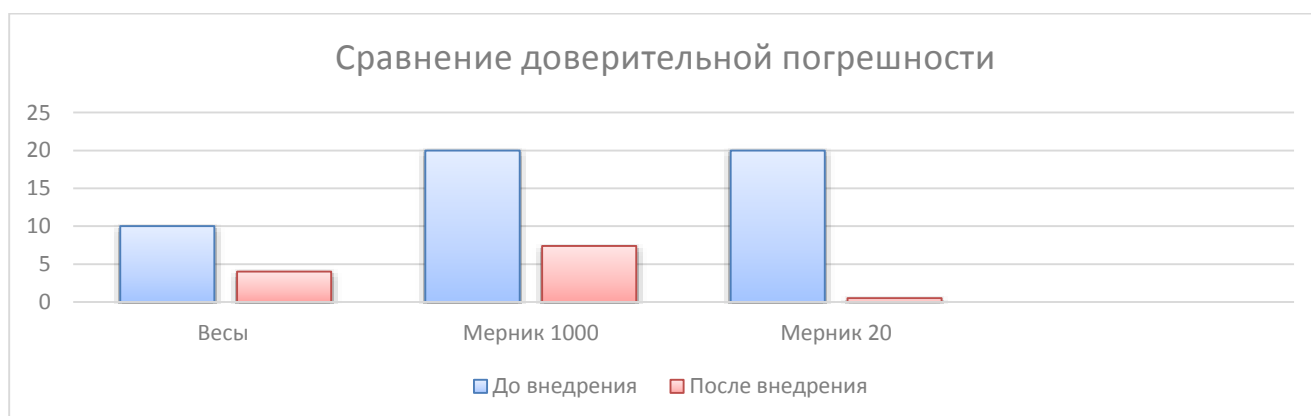
Полученное значение  $W(V_g) = 0,0002 \%$  расширенной неопределенности вместимости горловины мерника в дальнейших расчетах не учитываем из-за малой величины, которая не влияет на полученный результат.

Результаты проведенных исследований подтвердили эффективность применения специальных весов с трехкомпонентными весоизмерительными датчиками. Эти весы имеют расширенную неопределенность не более  $\pm 0,0074 \%$  при доверительной вероятности  $P = 0,95$ , что в 2,7 раза меньше, по сравнению с метрологическими характеристиками применяемых в настоящее время эталонных мерников 1-го разряда. Сравнение метрологических характеристик представлены в таблице 2.8. и на рисунке 2.4, который наглядно демонстрирует эффективность применения новой методики измерений.

**Таблица 2.8** Сравнение МХ весов и мерников до и после внедрения методики измерений

Наименование эталона	Предел допускаемой доверительной границы суммарной погрешности при доверительной вероятности $P = 0,95$ (расширенной неопределенности), %	
	До внедрения методики измерений	После внедрения методики измерений
Весы ВСПМ-1500	$\pm 0,01 \%$	$\pm 0,004 \%$
Мерник OGSB-1000	$\pm 0,02 \%$	$\pm 0,0074 \%$
Мерник OGSB-20	$\pm 0,02 \%$	$\pm 0,0005 \%$

Метрологические характеристики весов и мерников наглядно представлены на рисунке 2.4, который наглядно демонстрирует эффективность применения новой методики измерений.



**Рис. 2.4** Сравнение метрологических характеристик весов и мерников до и после внедрения весов ВСПМ-1500

## 2.5 Исследования метрологических характеристик трубопоршневой поверочной установки

Передача единицы объема ТПУ от мерника вместимостью 1000 дм<sup>3</sup> [46, 74] с применением компаратора (счетчика), доверительные границы суммарной погрешности:

$$\delta(P) = \pm K_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma}, \quad (2.49)$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{(S_{\theta_{\bar{y}}})^2 + (S_0^{CЧ})^2 + (S_0^{ТПУ})^2}, \quad (2.50)$$

$$K_{\Sigma} = \frac{t_P^m \cdot \sqrt{(S_0^{CЧ})^2 + (S_0^{ТПУ})^2 + \theta_{\Sigma_0}}}{\sqrt{(S_0^{CЧ})^2 + (S_0^{ТПУ})^2 + S_{\theta_{\bar{y}}}}}, \quad (2.51)$$

$$S_{\bar{y}} = \sqrt{S_{Ксч}^2 + S_{V0}^2}, \quad (2.52)$$

$$S_{\theta_{\bar{y}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \theta_{Xi}^2}{3}} = \sqrt{\frac{\theta_M^2 + \theta_{t1}^2 + \theta_{t2}^2 + \theta_{ИВК_N}^2 + \theta_{ИВК_{Ксч}}^2}{3}}, \quad (2.53)$$

где  $\theta_{\bar{y}}$  – доверительные границы неисключенной систематической погрешности, %, определяемые по формуле

$$\theta_{\Sigma_0} = k \cdot \sqrt{\theta_M^2 + \theta_{t1}^2 + 2 \cdot \theta_{t2}^2 + \theta_{t3}^2 + 2 \cdot \theta_{P1}^2 + \theta_{P2}^2 + \theta_{ИВК_N}^2 + \theta_{ИВК_{Ксч}}^2 + \theta_Q^2 + \theta_{исп}^2 + \theta_{пуз}^2}; \quad (2.54)$$

$\theta_M$  – границы составляющей неисключенной систематической погрешности, обусловленной погрешностью определения вместимости мерника,  $\theta_M = \pm 0,01$  %;

$\theta_{t1}, \theta_{t2}$  – границы составляющих неисключенных систематических погрешностей, обусловленных погрешностью измерений температуры, %, вычисляемые по формулам:

$$\theta_{t1} = \beta \cdot 100 \cdot \Delta t_M; \quad (2.55)$$

$$\theta_{t2} = \beta \cdot 100 \cdot \Delta t_{CЧ}; \quad (2.56)$$

$$\theta_{t3} = \beta \cdot 100 \cdot \Delta t_{ТПУ} = 0,0037\%; \quad (2.57)$$

$\theta_{ИВК_N}$  – границы составляющей неисключенной систематической погрешности, обусловленной погрешностью ИВК при измерении количества импульсов от счетчика-компаратора, %;

$\theta_{ИВК_{Ксч}}$  – границы составляющей неисключенной систематической погрешности, обусловленной погрешностью ИВК при вычислении коэффициента преобразования счетчика-компаратора в точке диапазона расхода, при котором определяют вместимость ТПУ, %.

При определении вместимости ТПУ с применением мерника и компаратора температуру рабочей жидкости определяют с применением лабораторных термометров, поэтому  $\theta_{ИВК_{Ксч}} = \theta_{ИВК_N} = \pm 0,005$  % для ИМЦ 07;

$\Delta t_M, \Delta t_{сч}$  – пределы допускаемых абсолютных погрешностей термометров при измерении температуры в мернике, счетчике-компараторе и ТПУ  
 соответственно,  $\Delta t_M = \Delta t_{сч} = \Delta t_{ТПУ} = \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

$\beta_e$  – коэффициент объемного расширения воды,  $\beta = 0,00026 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ;

$S_{V0}$  – СКО случайной погрешности определения среднего значения вместимости ТПУ,  $S_{V0} = 0,003 \text{ } \%$ ;

$T$  – коэффициент Стьюдента, для  $P=0,95$  и  $n=11$   $t=2,228$ ,  $P=0,99$  и  $n=11$   $t=3,169$ ;

$K$  – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом составляющих НСП и их соотношением, для  $P=0,95$   $k=1,1$ ;  $P=0,99$   $k=1,4$  при  $m>4$ .

Доверительные границы суммарной погрешности  $\Delta(0,95) = 0,018 \text{ } \%$ ,  $\Delta(0,99) = 0,024 \text{ } \%$ .

Бюджет неопределенности передачи единицы объема ТПУ представлен в таблице 2.9.

**Таблица 2.9** Бюджет неопределенности передачи единицы объема ТПУ [46]

Источники стандартной неопределенности	Значение, %
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу А, возникающая при определении среднего значения вместимости ТПУ (СКО случайной погрешности определения среднего значения вместимости ТПУ $S_{V0}$ при числе измерений 11)	0,003
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу А, возникающая при определении среднего значения коэффициента преобразования счетчика-компаратора (СКО случайной погрешности определения среднего значения коэффициента преобразования счетчика-компаратора $S_{Ксч}$ при числе измерений 10)	0,003
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения вместимости мерника $\left(\frac{\theta_M}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,01}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения температуры $\left(\frac{\theta_{t1}}{\sqrt{3}}, \frac{\theta_{t2}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,0037}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения количества импульсов от счетчика-компаратора $\left(\frac{\theta_{ИВК_N}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,005}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения коэффициента преобразования счетчика-компаратора в точке диапазона расхода, при котором определяют вместимость ТПУ $\left(\frac{\theta_{ИВК_{Ксч}}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,005}{\sqrt{3}}$

Суммарная стандартная неопределенность [46]:

$$u_c = \sqrt{S_{Kcч}^2 + S_{V0}^2 + \frac{\theta_M^2 + \theta_{t1}^2 + \theta_{t2}^2 + \theta_{ИВК_N}^2 + \theta_{ИВК_{Kcч}}^2}{3}} = 0,009 \%. \quad (2.58)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,95 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) [46, 74]:

$$U(0,95) = 2u_c = 0,018 \%. \quad (2.59)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,99 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) [46, 74]:

$$U(0,99) = 3u_c = 0,027 \%. \quad (2.60)$$

## 2.6 Исследования метрологических характеристик компакт-прувера

Передача единицы объема КП от мерника вместимостью 20 дм<sup>3</sup> [46, 75], доверительные границы суммарной погрешности:

$$\delta(P) = \pm K_\Sigma \cdot S_\Sigma, \quad (2.61)$$

$$S_\Sigma = \sqrt{S_{\theta_y}^2 + S_y^2}, \quad (2.62)$$

$$K_\Sigma = \frac{t_p^n \cdot S_0^{ИВ} + \theta_{\Sigma_0}}{S_0^{ИВ} + S_{\theta_y}}, \quad (2.63)$$

$$S_\Sigma = \sqrt{S_{V_0}^2 + S_{\theta_y}^2}, \quad (2.64)$$

$$S_{\theta_y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \theta_{Xi}^2}{3}} = \sqrt{\frac{\theta_M^2 + \theta_t^2}{3}}, \quad (2.65)$$

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности КП при хранении и передаче единицы объема:

$$\theta_{\bar{y}} = (HСП_V) = \sqrt{\theta_M^2 + \theta_t^2}, \quad (2.66)$$

- где  $\theta_M$  – границы составляющей неисключенной систематической погрешности, обусловленной погрешностью определения вместимости мерника, %  
 $\theta_M = \pm 0,01 \%$ ;
- $\theta_t$  – границы составляющей неисключенной систематической погрешности, обусловленной погрешностью измерений температуры, %, вычисляемые по формуле  
 $\theta_{t1} = \pm 0,0037\%$  ;
- $\Delta t_M$ , – пределы допускаемых абсолютных погрешностей термометров при измерении температуры в мернике и ТПУ.

$$\Delta t_{ТПУ} \quad \Delta t_M = \Delta t_{ТПУ} = \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$\beta_g$  – коэффициент объемного расширения воды,  $1/^\circ\text{C}$ .  $\beta = 0,00026 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ .

Доверительные границы суммарной погрешности  $\Delta(0,95)=0,017 \text{ } \%$ ,  $\Delta(0,99)=0,022 \text{ } \%$ .

Бюджет неопределенности КП представлен в таблице 2.10.

**Таблица 2.10** Бюджет неопределенности КП [46]

Источники стандартной неопределенности	Значение, %
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу А, возникающая при определении среднего значения вместимости компакт-прувера (СКО случайной погрешности определения среднего значения вместимости компакт-прувера $S_{V_0}$ при числе измерений 7)	0,006
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения вместимости мерника $\left(\frac{\theta_M}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,01}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения температуры $\left(\frac{\theta_t}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,0037}{\sqrt{3}}$

Суммарная стандартная неопределенность [46]:

$$u_c = \sqrt{S_{V_0}^2 + \frac{\theta_M^2 + \theta_t^2}{3}} = 0,008 \text{ } \%. \quad (2.67)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,95 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) [46]:

$$U(0,95) = 2u_c = 0,017 \text{ } \%. \quad (2.68)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,99 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) [46]:

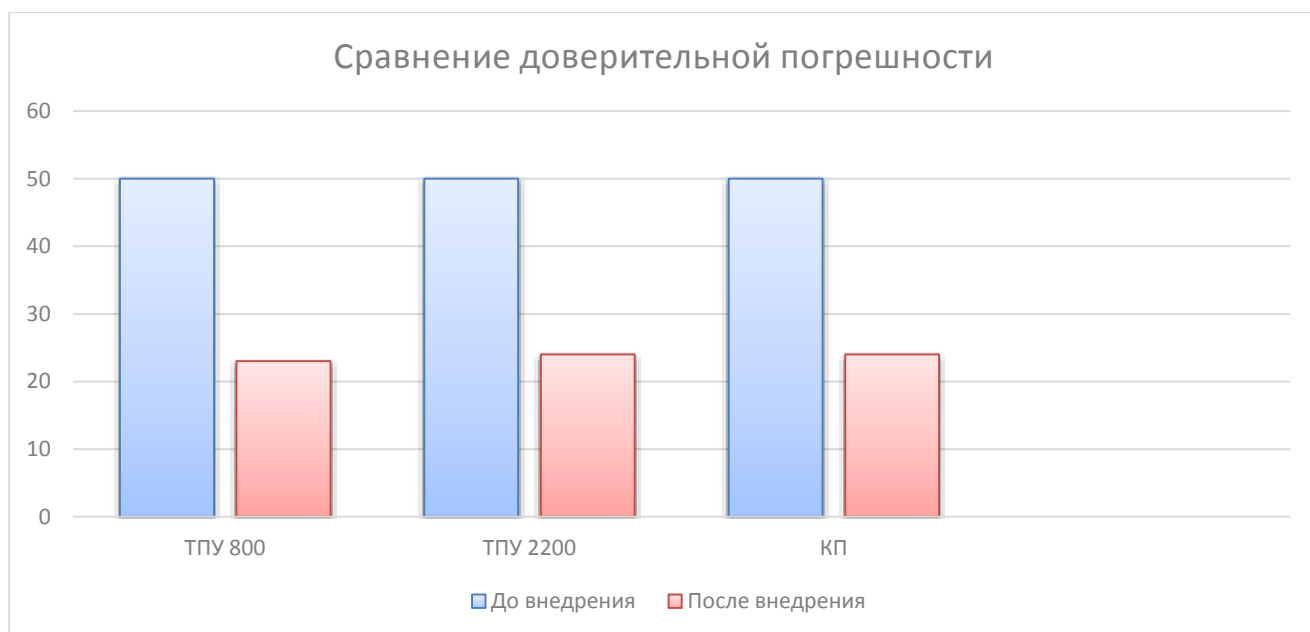
$$U(0,99) = 3u_c = 0,025 \text{ } \%. \quad (2.69)$$

Пределы допускаемой доверительной границы суммарной погрешности, полученные в результате исследований метрологических характеристик ТПУ и компакт-прувера представлены в таблице 2.11 и на рисунке 2.5, где видно двукратное уменьшение погрешности после внедрения новой методики.

**Таблица 2.11** Сравнение МХ ПУ после внедрения методики измерений

Наименование эталона	Допускаемая доверительная граница суммарной погрешности при доверительной вероятности $P = 0,99$ (расширенной неопределенности); % для ПУ 1-го разряда	
	До внедрения методики измерений	После внедрения методики измерений
ТПУ OGSB-800	$\pm 0,05$	$\pm 0,026$
ТПУ OGSB-2200	$\pm 0,05$	$\pm 0,027$
Компакт-прувер Brooks	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$

В результате экспериментальных исследований были получены объемы калиброванных участков ТПУ и компакт-прувера с расширенной неопределенностью не более  $\pm 0,027$  %, что в 1,9 раза лучше по сравнению с метрологическими характеристиками применяемых в настоящее время эталонных ТПУ и компакт-пруверов 1-го разряда, Приложения Д, Е.



**Рис. 2.5** Сравнение метрологических характеристик ТПУ и КП после внедрения весов ВСПМ-1500

## 2.7 Выводы по главе 2

1. Метод с применением компаратора, гири  $F_2$  20 кг, набора гирь  $M_1$  массой 1500 кг для поверки специальных весов с погрешностью не более  $\pm 0,01$  % доказал свою эффективность практическим применением на протяжении более 20-ти лет.

2. В основе совершенствования МО измерений массы и объема углеводородных жидкостей положены специальные весы ВСПМ [46, 71] с тремя независимыми весоизмерительными



датчиками, воспринимающими вертикальную и горизонтальные составляющие по осям X, Y, Z, что позволяет:

- решить актуальную на сегодня задачу - поверка на месте эксплуатации без применения эталонных гирь или компаратора, позволяющая демонтировать весоизмерительные датчики и проводить их поверку с помощью эталонных гирь или на эталонной установке единицы силы прямого нагружения;

- весоизмерительным датчикам воспроизвести условия приложения силы при монтаже датчиков в месте поверки и на месте эксплуатации после поверки;

- применить методику с применением компаратора, гири  $F_1$  20 кг, набором гирь класса  $M_1$  для поверки эталонных весов ВСПМ с погрешностью не более  $\pm 0,005$  %;

- выполнить поверку эталонных весов ВСПМ с погрешностью не более  $\pm 0,005$  % набором гирь 1500 кг класса  $F_1$  или  $F_2$ ;

- выполнить поверку эталонных весов ВСПМ с погрешностью не более  $\pm 0,005$  % передачей единицы силы от рабочего эталона единицы силы 3-го разряда, который является наиболее оптимальным, эффективным и наименее затратным.

3. Существующая иерархическая система передачи единицы массы и объема жидкости ограничивает точность рабочих средств точностью утвержденного ГПЭ, разработанные методики поверки позволили снять это ограничение и повысить точность измерений.

4. Методика измерений на базе специальных весов ВСПМ при определении вместимости эталонных мерников позволяет решить задачу импортозамещения средств измерений и обеспечить достоверные измерения за счет повышения точности эталонов, применяемых для поверки ПУ и ПР при добыче, транспортировке, хранении и приемо-сдаточных операциях жидких углеводородов.

5. Результаты исследований подтвердили преимущество предложенных методик измерений на базе весов с трехкомпонентными весоизмерительными датчиками для поверки эталонных мерников вместимостью 1000  $\text{дм}^3$  высокого класса точности с расширенной неопределенностью не более  $\pm 0,0074$  % при доверительной вероятности  $P = 0,95$ , что в 2,7 раза лучше по сравнению с метрологическими характеристиками применяемых в настоящее время эталонных мерников 1-го разряда 1000  $\text{дм}^3$ .

6. В результате экспериментальных исследований были определены объемы калиброванных участков ТПУ и компакт-прувера с расширенной неопределенностью не более  $\pm 0,027$  %, что в 1,9 раза выше по сравнению с метрологическими характеристиками применяемых в настоящее время эталонных ТПУ и компакт-пруверов 1-го разряда.

### Глава 3. Новая методики поверки поверочных установок с применением специальных весов

#### 3.1 Методика поверки специальных весов и определение калибровочных коэффициентов

Методика поверки весов специальных ВСПМ [46, 71], предназначенных для поверки эталонных мерников 1-го разряда, впервые была опробована на заводе ООО «СНГБ» в г. Калининград при поверке ТПУ и на заводе ООО ВК «Тензо-М» в г. Красково при поверке специальных эталонных мерников высокого класса точности, входящих в состав поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» г. Белгород. В методике были применены следующие обозначения [38] и определения, таблица 3.1.

**Таблица 3.1** Обозначения и определения [71]

Обозначения	Определения
$I_1, I_2, I_3$	Показания весов с датчиков $C1, C2, C3$
$A1, A2$	Матрицы показаний весоизмерительных датчиков при нагрузках $M1$ и $M2$
$M1, M2$	Испытательные нагрузки
$m$	Вектор масс измеряемых грузов
$k$	Вектор коэффициентов преобразования весоизмерительных датчиков
$\Delta$	Погрешность показаний весов
$\Delta_{\text{сист}}$	Систематическая погрешность показаний весов
$N$	Число измерений при определении коэффициентов преобразования весоизмерительных датчиков
$S$	Групповое СКО
$\epsilon$	Вектор остаточных погрешностей
$m_r$	Масса эталонной гири
$s$	СКО показаний датчиков
$u_m$	Неопределенность, связанная с эталонными гирями
$u_d$	Неопределенность, связанная с разрешающей способности дисплея весов
$u_0$	Неопределенность, связанная с дрейфом нуля весов
$\Delta m$	Вектор остаточных погрешностей
$U$	Расширенная неопределенность показаний весов

Погрешность проводимых измерений в значительной степени зависит от самих поверяемых средств измерений, а не только от средств измерений калибровочной лаборатории, но, до некоторой степени она может быть снижена путём увеличения количества измерений, выполняемых во время поверки. Значение неопределённости рассчитывается по результатам поверки [36].

Основные средства измерений, применяемые при поверке [71]:

- рабочий эталон единицы силы 1-го разряда по ГОСТ Р 8.663-2009 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений силы» [26] с пределом допускаемой относительной погрешности  $\pm 0,002 \%$ ;

- эталонные гири 3-го разряда (класс точности F<sub>2</sub>) массой 500 кг в количестве 4-х шт. или 75 штук массой 20 кг по ГОСТ 8.021 -2005 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений массы» [24] с пределом допускаемой относительной погрешности ± 0,0016 %;
- гравиметр с диапазоном измерений 9,77...9,85 м/с<sup>2</sup> и относительной погрешностью  $\delta_0 = 60 \cdot 10^{-8} \dots 100 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$ ;
- термометр цифровой малогабаритный ТЦМ 9410 М1 с пределами допускаемой абсолютной погрешности ± 0.06 °С.

Условия выполнения измерений [71]:

- основным условием получения положительного результата при выполнении измерений является обеспечение температурной стабилизации оборудования и средств измерений при постоянной температуре не менее 8 часов до начала измерений;
- постоянную температуру окружающего воздуха необходимо поддерживать в диапазоне  $20 \pm 5 \text{ °С}$ , градиент изменения температуры окружающего воздуха не должен превышать  $0,5 \dots 1 \text{ °С}$  в час.

При поверке весов выполняются следующие операции [71]:

- определение коэффициентов преобразования весоизмерительных датчиков весов и их неопределенностей при нагрузках 500 и 1000 кг;
- определение среднего квадратического отклонения показаний весов при испытательных нагрузках 500 и 1000 кг, соответствующих массе пустого и заполненного водой мерника;
- определение неисключенной систематической погрешности весов и среднего квадратического отклонения показаний весов при нагрузках 500 и 1000 кг;
- определение расширенной неопределенности показаний весов при произвольной нагрузке.

Операции поверки, определения коэффициентов, погрешности и неопределенностей представлены в главе 2.3 настоящей работы [71].

### 3.2 Поверка эталонного мерника

Методика поверки [11, 46, 71] описывает процедуру калибровки эталонного мерника весовым методом. В методике поверки были применены обозначения [38], приведенные в таблице 3.2.

**Таблица 3.2** Обозначения и определения [72]

Обозначение	Определение
$I_m$	Показание весов, соответствующее массе воды в мернике

$I_w$	Показания весов с эталонными гирями, замещающими массу воды в мернике
$I_\Sigma$	Показание весов, соответствующее массе воды в горловине
$I_{+N}$ и $I_{-N}$	Показание весов, соответствующее массе воды в горловине от номинальной отметке до максимальной верхней и максимальной нижней отметки шкалы
$m_w$	Масса эталонных гирь, замещающих массу воды в мернике
$V_{nom}$	Номинальное значение вместимости мерника
$V_{20}$	Действительное значение вместимости мерника при 20 °С
$V_N$	Действительное значение вместимости мерника на $N$ -ой отметке шкалы
$V_g$	Действительное значение вместимости горловины при 20 °С
$\Delta V$	Погрешность мерника
$V_{+N}^{20}$ и $V_{-N}^{20}$	Значения вместимости горловины от номинальной отметке до верхней максимальной и нижней минимальной отметке шкалы при 20 °С
$\rho_w^t$	плотность воды в мернике
$\rho N_w^t$	плотность воды в горловине мерника
$\rho_a^t$	плотность окружающего воздуха при взвешивании воды в мернике
$\rho N_a^t$	плотность окружающего воздуха при взвешивании воды в горловине
$\rho W$	плотность материала эталонных гирь, кг/м <sup>3</sup>
$t_1$ и $t_2$	температура воды на верхнем и нижнем уровнях мерника
$t$	среднее значение температуры воды в мернике
$\beta$	Объемный коэффициент температурного расширения мерника
$N$	число делений шкалы от номинальной отметке
$N_{max}$	максимальное число делений шкалы от номинальной отметке до верхней и нижней отметок
$u_{mw}$	Стандартная неопределенность массы гирь
$u_{\rho w}$	Стандартная неопределенность плотности гирь
$u_{\rho a}$	Стандартная неопределенность плотности окружающего воздуха
$u_{\rho t}$	Стандартная неопределенность плотности воды
$u_{Im}$	Стандартная неопределенность взвешивания воды в мернике
$u_{IW}$	Стандартная неопределенность взвешивания гирь
$u_t$	Стандартная неопределенность измерений температуры
$u_\beta$	Стандартная неопределенность температурного коэффициента объемного расширения мерника
$u_c(V_g)$	Стандартная неопределенность вместимости мерника
$u_c(V_g)$	Стандартная неопределенность вместимости горловины

$u_{I\sigma}$	Стандартная неопределенность взвешивания воды в горловине
$U(V_{20})$	Расширенная неопределенность вместимости мерника при коэффициенте охвата $k = 2$
$W(V_{20})$	Расширенная относительная неопределенность вместимости мерника при коэффициенте охвата $k = 2$
$U(V_g)$	Расширенная неопределенность вместимости горловине при коэффициенте охвата $k = 2$
$W(V_g)$	Расширенная относительная неопределенность вместимости горловине при коэффициенте охвата $k = 2$

При проведении поверке мерника выполняют следующие операции [72]:

- определение массы пустого и заполненного дистиллированной водой мерника;
- определение действительного значения вместимости мерника;
- определение массы и вместимости горловины, цены деления шкалы мерника;
- определение погрешности и расширенной неопределенности вместимости мерника;
- определение погрешности и расширенной неопределенности вместимости горловины мерника.

Основные средства поверки [72]:

- эталонные гири 3-го разряда массой 500 кг в количестве 2-х шт. по ГОСТ 8.021-2005 [24], имеющие прослеживаемость к государственному первичному эталону единицы массы ГЭТ 3-2008;
- весы специальные ВСПМ на максимальную нагрузку 1500 кг и пределами допускаемой относительной погрешности  $\pm 0,005 \%$ ;
- термометр цифровой малогабаритный ТЦМ 9410 М1 с диапазоном  $(-10 \dots 50) \text{ }^\circ\text{C}$  и пределами допускаемой абсолютной погрешности  $\pm 0.06 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- стеклянный цилиндр 1-го класса точности номинальной вместимостью  $2 \text{ дм}^3$  с допускаемой погрешностью  $0.01 \text{ дм}^3$ .

Условия поверки [72]:

- калибровочная жидкость – вода дистиллированная;
- температура воды и окружающего воздуха,  $^\circ\text{C}$  .....от 15 до 25;
- изменение температуры воды во время калибровки,
- не более,  $^\circ\text{C}$  ..... $\pm 0,2$ ;
- изменение температуры окружающего воздуха,
- не более,  $^\circ\text{C}$  ..... $\pm 0,5$ .

Определение действительного значения вместимости мерника. Вместимость до нулевой отметки шкалы мерника определяют методом замещения или методом прямых измерений. Мерник, заполненный водой до отметки номинальной вместимости, сличают с эталонными гирями на весах специальных ВСПМ с относительным значением СКО не более 0,0025 % .

Мерник устанавливают на платформе весов, показания весов устанавливают на «0»- тарируют. Через впускной кран мерник заполняют дистиллированной водой до отметки номинальной вместимости. По истечении 10 минут, измеряют и регистрируют температуру воды в термокарманах  $t_1$  и  $t_2$ , принимая температуру мерника равной среднему арифметическому  $t$  из двух измеренных значений  $t_1$  и  $t_2$ . Регистрируют показания весов  $I_m$  [12, 60, 72].

Устанавливают гири, замещающие воду, общей массой  $m_w$ , близкой к измеренному значению  $I_m$ , регистрируют показания весов  $I_w$ . Сливают воду из мерника. По окончании слива делают выдержку на слив капель в течение 60 сек [12, 60, 72].

Вместимость мерника на любой точке отметки шкалы определяют как сумму (разность – для отметок, расположенных ниже отметки номинальной вместимости) номинальной вместимости мерника и вместимости его горловины от отметки номинальной вместимости до выбранной отметки [12, 60, 72].

Заполняют мерник водой выше отметки конечного значения шкалы (верхняя отметка шкалы). После 10 минут выдержки измеряют температуру воды в мернике и регистрируют температуру, принимая температуру мерника равной температуре воды. Устанавливают на весы смоченную вспомогательную емкость. Показания весов устанавливают на «0». Сливают воду из мерника во вспомогательную емкость до уровня числовой отметки конечного значения шкалы. Наполненный сосуд устанавливают на весы, взвешивают и регистрируют значение массы воды во вспомогательной емкости, взвешивание проводят с выполнением условий по изменению температуры воды и воздуха. Затем устанавливают на весы гири, замещающие воду, общей массой близкой к измеренному значению массы воды, регистрируют показания весов. Сливают воду из вспомогательной емкости [12, 27, 60, 72].

Обработку результатов измерения вместимости между отметками начального значения шкалы (нижней отметки) и конечного значения шкалы (верхней отметки) испытуемого мерника проводят по алгоритму обработки результатов вместимости мерника приведенному выше [27, 60]. Вместимость между крайними отметками шкалы определяют не менее двух раз. При этом относительная разность между результатами измерений не должна превышать 0,01 %, а относительные разности между каждым из этих результатов и номинальным значением вместимости шкалы не должны превышать 0,01 %.

Полученные при измерениях вместимости шкалы значения массы воды, переводят в значения объема, при температуре 20 °С. Цену деления шкалы горловины определяют, как частное от деления вместимости горловины на число делений [60].

Действительное значение вместимости мерника [72] на номинальной отметке при 20 °С рассчитывают по формуле:

$$V_{20} = m_W(\rho_W - \rho_a) \frac{I_m[1 - (t-20)\beta]}{I_W\rho_W(\rho_t - \rho_a)} \quad (3.1)$$

Действительное значение вместимости [72] горловины на максимальной верхней отметке шкалы при 20 °С рассчитывают по формуле:

$$V_{+N}^{20} = \frac{I_{+N}}{(\rho_w^t - \rho_a^t)} \left[ 1 - \frac{2}{3}\beta(t - 20) \right] \quad (3.2)$$

Действительное значение вместимости [72] горловины на минимальной нижней отметке шкалы при 20 °С рассчитывают по формуле:

$$V_{-N}^{20} = \frac{I_{-N}}{(\rho_w^t - \rho_a^t)} \left[ 1 - \frac{2}{3}\beta(t - 20) \right] \quad (3.3)$$

Погрешность мерника  $\Delta V$  находят как разность между его действительным и номинальным значениями:

$$\Delta V = V_{20} - V_{nom} \quad (3.4)$$

Вместимость мерника  $V_N$  при 20 °С на  $N$ -ой отметке шкалы находят по формуле:

$$V_N = V_{20} \pm \frac{N}{N_{max}} V_{\pm N}^{20} \quad (3.5)$$

В формуле (3.16) применять знак «+» для отметок шкалы выше нулевой отметки, знак «-» для отметок шкалы ниже нулевой отметки.

Суммарную стандартную неопределенность результата определения вместимости мерника на номинальной отметке шкалы [72] рассчитывают по формуле:

$$u_c(V_{20}) = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{20}}{\partial m_W} u_{m_W}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_W} u_{\rho_W}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_a} u_{\rho_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial I_m} u_{I_m}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial t} u_t\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \beta} u_\beta\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial I_W} u_{I_W}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_t} u_{\rho_t}\right)^2} \quad (3.6)$$

Вместимость горловины от минимальной нижней до максимальной верхней отметок рассчитывают по формуле:

$$V_g = V_{+N}^{20} + V_{-N}^{20} \quad (3.7)$$

Получаем функциональную зависимость для вместимости горловины:

$$V_g = \frac{I_\Sigma}{(\rho_w^t - \rho_a^t)} \left[ 1 - \frac{2\beta(t-20)}{3} \right] \quad (3.8)$$

Здесь  $I_\Sigma = I_{+N} + I_{-N}$  . (3.9)

Суммарную стандартную неопределенность результата определения вместимости горловины рассчитывают по формуле [72]:

$$u_c(V_g) = \sqrt{\left(\frac{\partial V_g}{\partial t} u_t\right)^2 + \left(\frac{\partial V_g}{\partial \beta} u_\beta\right)^2 + \left(\frac{\partial V_g}{\partial \rho_a^t} u_{\rho_a^t}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_g}{\partial \rho_w^t} u_{\rho_w^t}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_g}{\partial I_\Sigma} u_{I_\Sigma}\right)^2}, \quad (3.10)$$

$$\text{где } \frac{\partial V_g}{\partial t} = \frac{2}{3} \beta \frac{I_\Sigma}{(\rho_w^t - \rho_a^t)}; \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial V_g}{\partial \beta} = \frac{2I_\Sigma}{3(\rho_w^t - \rho_a^t)} (t - 20); \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial V_g}{\partial \rho_a^t} = -\frac{I_\Sigma}{(\rho_w^t - \rho_a^t)^2} \left[1 - \frac{2}{3}\beta(t - 20)\right]; \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial V_g}{\partial \rho_w^t} = -\frac{I_\Sigma}{(\rho_w^t - \rho_a^t)^2} \left[1 - \frac{2}{3}\beta(t - 20)\right]; \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial V_g}{\partial I_\Sigma} = \frac{1 - \frac{2}{3}\beta(t - 20)}{(\rho_w^t - \rho_a^t)}. \quad (3.15)$$

Действительное значение вместимости мерника на номинальной отметке при 20 °С по второму способу [72] рассчитывают по формуле:

$$V_{20} = \frac{\left(1 - \frac{\rho_a^t}{\rho_w^t}\right) \cdot I_m \cdot [1 - \beta(t - 20)]}{(\rho_w^t - \rho_a^t)}. \quad (3.16)$$

Суммарную стандартную неопределенность результата определения вместимости мерника на номинальной отметке шкалы [72] при измерениях методом замещения рассчитывают по формуле:

$$u_c(V_{20}) = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_w} u_{\rho_w}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_a} u_{\rho_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial I_m} u_{I_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial t} u_t\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \beta} u_\beta\right)^2 + \left(\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_t} u_{\rho_t}\right)^2}, \quad (3.17)$$

Коэффициенты чувствительности

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_w} = \frac{I_m \rho_a [\beta(t - 20) - 1]}{\rho_w^2 (\rho_a - \rho_t)}; \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_a} = \frac{I_m (\rho_w - \rho_t) (20\beta - \beta t + 1)}{\rho_w (\rho_a - \rho_t)^2}; \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial I_m} = -\frac{m_w (\rho_a - \rho_w) [\beta(t - 20) - 1]}{I_w \rho_w (\rho_a - \rho_t)}; \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial t} = -\frac{\beta I_m \left(\frac{\rho_a}{\rho_w} - 1\right)}{\rho_a - \rho_t}; \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial \beta} = -\frac{I_m (t - 20) \left(\frac{\rho_a}{\rho_w} - 1\right)}{\rho_a - \rho_t}; \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_t} = -\frac{I_m [\beta(t - 20) - 1] \left(\frac{\rho_a}{\rho_w} - 1\right)}{(\rho_a - \rho_t)^2}. \quad (3.23)$$



Расширенная неопределенность вместимости мерника рассчитывается, исходя из нормального закона распределения и вероятности охвата 0,95. В этом случае коэффициент охвата  $k = 2$ . Тогда расширенная неопределенность:

$$U(V_{20}) = 2 \cdot u_c(V_{20}), \text{ м}^3 \quad (3.24)$$

или в относительном виде:  $U_0(V_{20}) = \frac{U(V_{20}) \cdot 10^{-5}}{1,0} \cdot 100 \% . \quad (3.25)$

### 3.3 Методика поверки трубопоршневых поверочных установок

Методика поверки [11, 46, 74, 78] выполнена на базе методики «Установки поверочные трубопоршневые. Методика поверки поверочными установками на базе мерника и объемного счетчика» [63, 74] и определяет требования к процедуре калибровки установок поверочных трубопоршневых высокого класса точности поверочной установкой (ТПУ) на базе мерника и объемного счетчика жидкости (СЖ).

Операции поверки [74]:

- определение метрологических характеристик СЖ;
- определение МХ ТПУ.

Основные средства поверки [46, 74]:

1. Мерник эталонный шкальный 1-го разряда с пределами допускаемой основной относительной погрешности  $\pm 0,01 \%$  и номинальной вместимостью 500 или 1000 дм<sup>3</sup>.
2. Счетчик жидкости камерный положительного вытеснения, предназначенный для измерений количества воды со значением среднего квадратического отклонения (СКО) случайной составляющей погрешности не более 0,01 %.
3. Преобразователи температуры или термометры с пределами допускаемой абсолютной погрешности  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ .
4. Преобразователи давления с пределами допускаемой приведенной погрешности  $\pm 0,1 \%$ .
5. Устройство обработки информации (УОИ) с пределами допускаемой относительной погрешности измерений количества импульсов  $\pm 0,005 \%$ .

Основные условия поверки [46, 74]:

1 При проведении поверки соблюдают следующие условия:

- температура окружающего воздуха,  $^\circ\text{C}$  от 10 до 30;
- поверочная жидкость вода питьевая;
- давление жидкости на выходе ТПУ, МПа, не менее 0,1;
- содержание свободного газа в поверочной жидкости не допускается.

2 Значение поверочного расхода ( $Q_1$ , м<sup>3</sup>/ч) при котором определяют метрологические характеристики (МХ), и значение расхода ( $Q_2$ , м<sup>3</sup>/ч), при котором производят контроль отсутствия протечек, устанавливают, исходя из следующих условий:

– значение расхода  $Q_1$  должно не менее, чем в 2 раза превышать значение  $Q_2$  ;

– значения расхода выбирают в пределах диапазона, в котором нормируются МХ ТПУ.

Допускается выбирать одно или оба значения расхода меньше нижнего предела диапазона расходов ТПУ, приведенного в эксплуатационной документации.

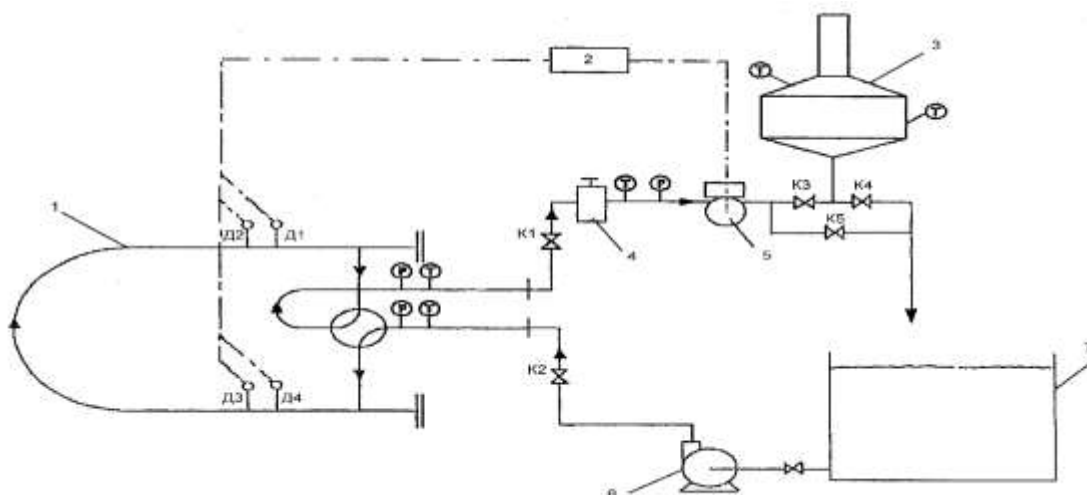
Значения расходов жидкости при поверке ТПУ приведены в таблице 3.3.

**Таблица 3.3** Значения расходов жидкости при поверке ТПУ [63]

Условный диаметр калиброванного участка, мм	$Q_1, \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_2, \text{ м}^3/\text{ч}$
150	3,2 – 40	1,6 – 10
300	12 – 40	6 – 20
400	22 – 40	11 – 20
500	36 – 40	18 – 20
600	40 – 50	20 – 25
750	40 – 60	20 – 30
920	40 – 60	20 – 30

Отклонение поверочного расхода от установленного значения в процессе поверки не должно превышать 2,5%, изменение температуры жидкости в ТПУ и СЖ не должно превышать 0,1 °С за время прохождения поршня в одном направлении от одного детектора до другого [63].

Монтаж технологической схемы поверки (Рис. 3.1). Все соединения трубопроводов, силовых и сигнальных кабелей необходимо выполнять в соответствии с требованиями эксплуатационной документации на ТПУ и ПУ [63, 74, 78].



**Рис. 3.1** Схема калибровки [46, 63, 74, 78]

1 – ТПУ; 2 – УОИ; 3 – эталонный мерник; 4 – фильтр; 5 – счетчик жидкости;

6 – насос; 7 – емкость-хранилище; Д1-Д4 – детекторы; К1,К2 – краны регулирующие; К3-

К5 – краны запорные; К5 – с контролем протечек.

Проверку отсутствия воздуха в схеме [63, 74] выполняют следующим образом: при открытых кранах К1, К2, К5 и закрытых кранах К3, К4 включают насос. С помощью кранов К1 и К2, ориентируясь на значения выходной частоты СЖ  $f'$ , 1/с, индицируемое УОИ, устанавливают расход жидкости через технологическую схему, приближенно равный расходу  $Q_1$ .

$$f' = \frac{Q_1 \times KF}{3600}, \quad (3.26)$$

где  $KF$  – заводской коэффициент преобразования СЖ, имп/м<sup>3</sup>.

Выполняют несколько пусков шарового поршня ТПУ. При этом открывают воздушные вентили, установленные на ТПУ, на верхних точках технологических трубопроводов, и т.д. и проверяют наличие воздуха, при необходимости воздух выпускают. Считают, что воздух в технологической системе отсутствует, если из воздушных вентилях вытекает струя рабочей жидкости без пузырьков воздуха [63, 74].

Контролируют стабилизацию температуры рабочей жидкости. Температуру считают стабильной, если за один проход поршня изменение температуры по показаниям преобразователей температуры (термометров), установленных на входе и выходе ТПУ и возле СЖ, не превышает 0,1 °С [46, 74].

Опробование выполняют в следующем порядке [63, 74] описанном ниже.

Закрывают кран К5. Открывают кран К3 и выполняют заполнение мерника, контролируя процесс заполнения по индикатору СЖ и по шкале мерника.

Закрывают кран К3. Если через 0,5 мин. после заполнения мерника уровень поверочной жидкости в нем, фиксируемый по шкале на горловине мерника, изменяется, то это свидетельствует о наличии протечек через краны К3, К4 и необходимости их устранения.

Открывают кран К4 и опорожняют мерник, выдержав 1 мин. закрывают кран К4.

В УОИ обнуляют, либо фиксируют текущее значение количества импульсов, сгенерированных СЖ и измеренных УОИ.

Открывают кран К3 и выполняют заполнение мерника. В процессе заполнения мерника фиксируют значения температуры и давления поверочной жидкости возле СЖ. За значения температуры и давления за время измерения принимают средние арифметические значений в начале и конце заполнения мерника.

Закрывают кран К3. С дисплея УОИ считывают значение количества импульсов, сгенерированных СЖ и измеренных УОИ за время измерения.

Через 0,5 мин. после заполнения мерника определяют объем воды в нем по шкале на горловине и снимают показания с датчиков температур (термометров) установленных в мернике.

Открывают кран К4 и опорожняют мерник, выдержав 1 мин. закрывают кран К4.

Рассчитывают уточненное значение частоты выходного сигнала СЖ  $f$ , 1/с, соответствующей расходу  $Q_1$ , м<sup>3</sup>/ч, по формуле:

$$f = \frac{Q_1 \times K^{Opr}}{3600}, \quad (3.27)$$

где  $K^{Opr}$  – коэффициент преобразования СЖ при опробовании, имп/м<sup>3</sup>.

При необходимости выполняют коррекцию расхода жидкости при помощи К1 и К2.

Открывают кран К5. Выполняют пуск шарового поршня ТПУ. При прохождении поршнем первого детектора Д1 в УОИ начинается, а при прохождении детектора Д3 заканчивается счет импульсов, поступающих с СЖ.

В процессе движения поршня при необходимости выполняют коррекцию расхода жидкости до значения  $Q_1$  при помощи К1 и К2.

В процессе прохождения поршнем измерительного участка ТПУ фиксируют значения температуры и давления поверочной жидкости возле СЖ, на входе и выходе ТПУ.

За значения температуры и давления жидкости в СЖ принимают средние арифметические значений в начале и в конце прохождения поршнем измерительного участка.

За значения температуры и давления жидкости в ТПУ принимают средние арифметические значений на входе и на выходе ТПУ в начале и в конце прохождения поршнем измерительного участка [74].

Определение МХ СЖ выполняют двумя сериями по пять измерений в каждой. Первую серию выполняют перед определением МХ ТПУ, вторую – после.

При открытых кранах К1, К2, К5 и закрытых кранах К3, К4 устанавливают расход жидкости через технологическую схему  $Q_1$ , ориентируясь на значения выходной частоты СЖ.

Вычисляют коэффициент преобразования СЖ по результатам первой серии измерений, имп/м<sup>3</sup>, определяют по формуле:

$$K_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} K_i}{n_1}, \quad (3.28)$$

где  $n_1$  – количество измерений в первой серии при определении МХ СЖ;  
 $K_i$  – коэффициент преобразования СЖ при  $i$ -ом измерении, имп/м<sup>3</sup>, значение которого определяют по формуле:

$$K_i = \frac{N_i \times C_{plm_i}}{V_i \times C_{tstp_i} \times C_{tdw_i}}, \quad (3.29)$$

где  $N_i$  – количество импульсов от СЖ, накопленное УОИ за время  $i$ -го измерения;  
 $V_i$  – объём жидкости в мернике при  $i$ -ом измерении, м<sup>3</sup>;

$C_{plm_i}$  – коэффициент, учитывающий влияние давления на объем жидкости в СЖ при  $i$ -ом измерении, значение которого определяют по формуле:

$$C_{plm_i} = \frac{1}{1 - P_{сч_i} \times F}, \quad (3.30)$$

где  $P_{сч_i}$  – значение давления жидкости в СЖ при  $i$ -ом измерении, МПа;

$F$  – коэффициент сжимаемости жидкости, для воды принимают равным  $4,91 \times 10^{-4}$  МПа $^{-1}$ ;

$C_{tstp_i}$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры на вместимость мерника при  $i$ -ом измерении, значение которого определяют по формуле

$$C_{tstp_i} = 1 + 3 \times \alpha_m \times (t_{mi} - 20), \quad (3.31)$$

где  $\alpha_m$  – коэффициент линейного расширения материала стенок мерника,  $1/^\circ\text{C}$ , значение которого определяют по таблице Б.1;

$t_{mi}$  – значение температуры жидкости в мернике при  $i$ -ом измерении,  $^\circ\text{C}$ ;

$C_{tdw_i}$  – комбинированный коэффициент, учитывающий влияние разности температур в СЖ и мернике на объем жидкости при  $i$ -ом измерении, значение которого определяют по формуле:

$$C_{tdw_i} = \frac{\rho_{mi}}{\rho_{сч_i}}, \quad (3.32)$$

где  $\rho_{mi}, \rho_{сч_i}$  – значения плотности воды, вычисленные по формуле (8) при температуре воды в мернике и СЖ соответственно:

$$\rho_t = 999,8395639 + 0,06798299989 \times t - 0,009106025564 \times t^2 + 0,0001005272999 \times t^3 - 0,000001126713526 \times t^4 + 0,000000006591795606 \times t^5 \quad (3.33)$$

Вычисляют СКО случайной составляющей погрешности СЖ для первой серии измерений, %, по формуле:

$$S_{01}^{сч} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} (K_i - K_1)^2}{n_1 - 1}} \times \frac{100}{K_1}. \quad (3.34)$$

Проверяют выполнение условия:

$$S_0^{сч} \leq 0,01 \%. \quad (3.35)$$

Вычисляют коэффициент преобразования СЖ по результатам суммарного по двум сериям количества измерений,  $\text{имп/м}^3$ , по формуле:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}, \quad (3.36)$$

где  $n$  – суммарное количество измерений при определении МХ СЖ.

Вычисляют СКО случайной составляющей погрешности СЖ для суммарного количества измерений, %, по формуле:

$$S_0^{CЧ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - K)^2}{n-1}} \times \frac{100}{K}. \quad (3.37)$$

Проверяют выполнение условия:

$$S_0^{CЧ} \leq 0,01 \%. \quad (3.38)$$

Вместимость измерительного участка ТПУ при стандартных условиях (температуре 20 °С и избыточном давлении, равном нулю),  $V_0$ , м<sup>3</sup>, определяют по формуле:

$$V_0 = \frac{\sum_{j=1}^m V_{0j}}{m}, \quad (3.39)$$

где  $m$  – количество измерений при определении МХ ТПУ;

$V_{0j}$  – вместимость измерительного участка ТПУ при стандартных условиях при  $j$ -ом измерении, м<sup>3</sup>, значение которой определяют по формуле:

$$V_{0j} = \frac{N_j \times Ctdw_j \times Cplm_j}{K \times Ctsp_j \times Cpsp_j \times Cplp_j}, \quad (3.40)$$

где  $Ctdw_j$  – комбинированный коэффициент, учитывающий влияние разности температур в ТПУ и СЖ на объем жидкости при  $j$ -ом измерении, значение которого определяют по формуле:

$$Ctdw_j = \frac{\rho_{CЧj}}{\rho_{ТПУj}}, \quad (3.41)$$

где  $\rho_{CЧj}, \rho_{ТПУj}$  – значения плотности воды, вычисленные по формуле (8) при температуре воды в СЖ и ТПУ соответственно;

$Cplm_j$  – коэффициент, учитывающий влияние давления на объем жидкости в СЖ при  $j$ -ом измерении, значение которого определяют по формуле:

$$Cplm_j = \frac{1}{1 - P_{CЧj} \times F}, \quad (3.42)$$

где  $P_{CЧj}$  – значение давления жидкости в СЖ при  $j$ -ом измерении, МПа;

$Ctsp_j$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры на вместимость измерительного участка ТПУ при  $j$ -ом измерении, значение которого определяют по формуле:

$$Ctsp_j = 1 + 3 \times \alpha_T \times (t_{ТПУj} - 20), \quad (3.43)$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент линейного расширения материала стенок ТПУ, 1/°С, значение которого определяют по таблице Б.1;

$t_{ТПУj}$  – среднее арифметическое значение температуры жидкости на входе и выходе ТПУ при  $j$ -ом измерении, °С;

$$C_{\text{psp}} = 1 + \frac{P_{\text{ТПУ } j} \times D}{E \times S}, \quad (3.44)$$

где  $P_{\text{ТПУ } j}$  – среднее арифметическое значение давления жидкости на входе и выходе ТПУ при  $j$ -ом измерении, МПа;

$D, S$  – внутренний диаметр и толщина стенок измерительного участка ТПУ соответственно, мм;

$E$  – модуль упругости материала стенок ТПУ, МПа;

$C_{\text{plp}} j$  – коэффициент, учитывающий влияние давления на объем жидкости в ТПУ при  $j$ -ом измерении, значение которого определяют по формуле:

$$C_{\text{plp}} j = \frac{1}{1 - P_{\text{ТПУ } j} \times F}. \quad (3.45)$$

СКО случайной составляющей погрешности ТПУ  $S_0^{\text{ТПУ}}$ , %, определяют по формуле:

$$S_0^{\text{ТПУ}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (V_{0j} - V_0)^2}{m-1}} \times \frac{100}{V_0}, \quad (3.46)$$

Проверяют выполнение условия:

$$S_0^{\text{ТПУ}} \leq 0,01\% \quad (3.47)$$

Границы суммарной систематической составляющей погрешности ТПУ (неисключенной систематической погрешности)  $\theta_{\Sigma_0}$ , %, по формуле:

$$\theta_{\Sigma_0} = k \times \sqrt{\theta_M^2 + \theta_{t_1}^2 + \theta_{t_2}^2 + \theta_K^2 + \theta_{\text{ИВК}}^2}, \quad (3.48)$$

где  $k$  – коэффициент зависимости неисключенных систематических составляющих погрешности от выбранной доверительной вероятности при их равномерном распределении; принимают равным 1,4 при числе суммируемых неисключенных систематических погрешностей больше четырех;

$\theta_M$  – предел допускаемой основной относительной погрешности мерника, %;

$\theta_{t_1}^2, \theta_{t_2}^2$  – границы составляющих неисключенных систематических погрешностей, обусловленных погрешностью измерений температуры, %, вычисляемые по формулам:

$$\theta_{t_1} = \beta \times 100 \times \sqrt{\Delta t_M^2 + \Delta t_{\text{СЧ}}^2}, \quad (3.49)$$

$$\theta_{t_2} = \beta \times 100 \times \sqrt{\Delta t_{\text{СЧ}}^2 + \Delta t_{\text{ТПУ}}^2}, \quad (3.50)$$

где  $\Delta t_M, \Delta t_{\text{СЧ}}, \Delta t_{\text{ТПУ}}$  – пределы допускаемых абсолютных погрешностей преобразователей температуры (термометров) при измерении температуры в мернике, СЖ и ТПУ соответственно, °С;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения жидкости, для воды принимают равным  $2,6 \times 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;

$\theta_K$  – граница составляющей неисключенной систематической погрешности определения среднего значения коэффициента преобразования СЖ, %, значение которой определяют по формуле:

$$\theta_k = t_{0,99}^n \times \frac{S_0^{сч}}{\sqrt{n}}, \quad (3.51)$$

где  $t_{0,99}^n$  – квантиль распределения Стьюдента при доверительной вероятности 0,99 и числе измерений  $n$ ;

$\theta_{ивк}$  – пределы допускаемой относительной погрешности измерений количества импульсов УОИ, %.

Границы случайной составляющей погрешности определения среднего значения вместимости ТПУ,  $\theta_{V_0}$ , %, определяют по формуле:

$$\theta_{V_0} = t_{0,99}^m \times \frac{S_0^{ТПУ}}{\sqrt{m}}, \quad (3.52)$$

где  $t_{0,99}^m$  – квантиль распределения Стьюдента при доверительной вероятности 0,99 и числе измерений  $m$ .

Относительную погрешность ТПУ, %, определяют по формуле:

$$\delta_0 = \begin{cases} Z \times (\theta_{\Sigma_0} + \theta_{V_0}) & \text{при } 0,8 \leq \theta_{\Sigma_0} / S_0^{ТПУ} \leq 8, \\ \theta_{\Sigma_0} & \text{при } \theta_{\Sigma_0} / S_0^{ТПУ} > 8; \end{cases} \quad (3.53)$$

где  $Z$  – коэффициент, зависящий от соотношения.

Проверяют выполнение условия:

$$\delta_0 \leq 0,03 \% \quad (3.54)$$

При проверке отсутствия протечек устанавливают выбранное значение расхода.

Выполняют первые три из шести измерений ( $n_{прот}=6$ ) для определения коэффициента преобразования СЖ.

Выполняют четыре измерения для определения вместимости измерительного участка ТПУ при стандартных условиях.

Если при выбранном значении расхода  $Q_2$  поршень не входит в измерительный участок ТПУ, то допускается увеличить расход с доведением его до  $Q_2$  до подхода поршня к первому детектору.

Определяют относительное отклонение вместимости ТПУ при различных значениях расхода, %,  $t$  по формуле:

$$\delta_V = \frac{V_0^{Прот} - V_0}{V_0} \times 100. \quad (3.55)$$

Проверяют выполнение условия:

$$|\delta_0| \leq 0,35 \% \times 0,03 \% \quad (3.56)$$

Если  $\delta_0 > 0,35 \% \times 0,03 \%$ , то это свидетельствует о наличии протечек рабочей жидкости в технологической схеме поверки и необходимости их устранения.



Если  $\delta_0 < -0,35 \% \times 0,03 \%$ , то это свидетельствует о допущенных ошибках при выполнении измерений и необходимости повторения измерений после устранения причин, вызвавших ошибки.

Суммарная стандартная неопределенность [46, 74]:

$$u_c = \sqrt{S_{Kcч}^2 + S_{V0}^2 + \frac{\theta_M^2 + \theta_{t1}^2 + \theta_{t2}^2 + \theta_{ИБК_N}^2 + \theta_{ИБК_{Kcч}}^2}{3}} \quad (3.57)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,95 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) [46, 74]:

$$U(0,95) = 2u_c \quad (3.58)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,99 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) [46, 74]:

$$U(0,99) = 3u_c \quad (3.59)$$

### 3.4 Методика поверки компакт-прувера

Методика выполнена на базе «Установки поверочные FMD. Методика поверки» [46, 69, 75] и определяет требования к процедуре калибровки установок поверочных высокого класса точности типа КП.

Операции поверки:

- определение МХ;
- проверка отсутствия протечек.

В методике рассмотрены два метода поверки: первый метод - с применением специального эталонного мерника 1-го разряда, второй метод – с применением эталонных весов высокого класса точности. Основные средства калибровки и их метрологические характеристики приведены в таблице 3.4.

**Таблица 3.4** Основные средства поверки [46, 69, 75]

Основные средства поверки	Метрологические характеристики
Первый метод	
Эталонный мерник 1-го разряда	Вместимостью 20 дм <sup>3</sup> , соответствующей вместимости измерительного участка поверяемой ПУ. Пределы допускаемой относительной погрешности $\pm 0,01 \%$
Преобразователи избыточного давления с унифицированным выходным сигналом	Диапазон измерений от 0 до 0,6 МПа, пределы допускаемой приведенной погрешности $\pm 0,1 \%$

Термопреобразователи сопротивления с унифицированным выходным сигналом	Диапазон измерений от 0 °С до 50 °С, пределы допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,1$ °С
------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------

Второй метод	
Весы электронные	Относительная погрешность весов $\pm 0,005$ %
Гири	Класс точности F <sub>2</sub> по ГОСТ 7328-2001 [14]
Преобразователи избыточного давления с унифицированным выходным сигналом	Диапазон измерений от 0 до 0,6 МПа, пределы допускаемой приведенной погрешности $\pm 0,1$ %
Термопреобразователи сопротивления с унифицированным выходным сигналом	Диапазон измерений от 0 °С до 50 °С, пределы допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,1$ °С

При проведении поверки соблюдают условия, приведенные в таблице 3.5.

**Таблица 3.5** Условия поверки [46, 69, 75]

Температура окружающего воздуха: - при поверке первым методом, °С - при поверке вторым методом, °С	20 $\pm$ 5 20 $\pm$ 5
Относительная влажность окружающего воздуха, %	от 30 до 80
Поверочная жидкость*: - при поверке первым методом, °С - при поверке вторым методом, °С	вода питьевая вода дистиллированная или неионизированная
Температура поверочной жидкости, °С	от 15 до 25
Изменение температуры поверочной жидкости за время одного измерения, °С, не более	0,1
Давление поверочной жидкости на выходе ПУ, МПа, не менее	0,1
Содержание свободного газа в поверочной жидкости	не допускается
Наличие внешних вибраций и тряски	не допускается

Значение поверочного расхода Q<sub>1</sub>, при котором определяют метрологические характеристики ПУ, и значение расхода Q<sub>2</sub>, при котором выполняют контроль отсутствия протечек, устанавливают, исходя из следующих условий:

- значение расхода Q<sub>1</sub> должно не менее, чем в 1,5 - 2 раза превышать значение Q<sub>2</sub>;

- значения расхода выбирают в пределах диапазона, в котором нормируются метрологические характеристики ПУ.

Определяют следующие метрологические характеристики:

- вместимость ПУ при стандартных условиях ( $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $P_{\text{изб.}} = 0\text{ МПа}$ );
- доверительную относительную погрешность при воспроизведении объема при доверительной вероятности 0,99.

Первый метод [46, 69, 75]

Определение вместимости ПУ при стандартных условиях основано на измерениях объема поверочной жидкости, вытесненной поршнем ПУ, с помощью эталонного мерника и приведения измеренного объема к стандартным условиям. При помощи регулятора расхода устанавливают требуемый расход поверочной жидкости. Контроль значения расхода поверочной жидкости осуществляют при помощи расходомера, допускается отклонение от установленного значения расхода поверочной жидкости не более чем на  $\pm 2,5\%$ . Заполняют эталонный мерник поверочной жидкостью, вытесненной поршнем ПУ. Выдерживают до успокоения поверочной жидкости и определяют объем поверочной жидкости в эталонном мернике. Показания снимают по нижнему краю мениска поверочной жидкости. Если уровень поверочной жидкости в эталонном мернике окажется ниже или выше отметки номинальной вместимости, то его устанавливают, доливая или сливая поверочную жидкость, измеряя ее объем мерными цилиндрами. Объем поверочной жидкости в эталонном мернике определяют вычитанием или сложением с объемом долитой или слитой поверочной жидкости. Если на горловине эталонного мерника имеются деления, нулевая отметка не имеет особого значения. Залить поверочную жидкость можно до любого уровня, записать уровень жидкости, а затем объем поверочной жидкости в эталонном мернике вычисляют математически по отрицательным или положительным показаниям шкалы. Минус означает, что уровень поверочной жидкости находится ниже нулевой отметки, плюс означает, что уровень жидкости выше нулевой отметки на шкале.

Второй метод [46, 69, 75]

Определение вместимости ПУ при стандартных условиях основано на измерениях массы поверочной жидкости, вытесненной поршнем ПУ в накопительную емкость, с помощью эталонных весов и вычисления объема поверочной жидкости при стандартных условиях по известной зависимости между массой и плотностью поверочной жидкости. При помощи регулятора расхода устанавливают требуемый расход поверочной жидкости. Контроль значения расхода поверочной жидкости осуществляют при помощи расходомера, допускается отклонение от установленного значения расхода поверочной жидкости не более чем на  $\pm 2,5\%$ . Сливают

поверочную жидкость, вытесненную поршнем ПУ, в накопительную емкость и взвешивают. Проводят не менее пяти измерений. За одно измерение принимают один проход поршня ПУ.

Обработка результатов измерений [46, 69, 75]

Первый метод

Вместимость ПУ при стандартных условиях  $V_0$ , м<sup>3</sup>, вычисляют по формуле:

$$V_0 = \frac{\sum_{i=1}^n V_{0i}}{n}, \quad (3.60)$$

где  $V_{0i}$  – значение вместимости ПУ при стандартных условиях при  $i$ -ом измерении, м<sup>3</sup>;

$n$  – количество измерений.

Вместимость ПУ при стандартных условиях при  $i$ -ом измерении  $V_{0i}$ , м<sup>3</sup>, вычисляют по формулам:

$$V_{0i} = V_{Mi} \cdot \text{CTDW}_{Mi} \cdot \frac{\text{CTS}_{Mi}}{\text{CTS}_{\text{ПУ}i}} \cdot \frac{1}{\text{CPS}_{\text{ПУ}i} \cdot \text{CPL}_{\text{ПУ}i}}, \quad (3.61)$$

$$V_{Mi} = V_{\text{МНОМ}}, \quad (3.62)$$

$$V_{Mi} = V_{\text{МНОМ}} + \Delta V_i, \quad (3.63)$$

$$\text{CTDW}_{Mi} = \frac{\text{RHO}_{Mi}}{\text{RHO}_{\text{ПУ}i}}, \quad (3.64)$$

$$\text{RHO}_{\text{М}(\text{ПУ}i)} = 999,97358 \cdot [1 - (a \cdot \Delta t_{\text{М}(\text{ПУ}i)} + b \cdot \Delta t_{\text{М}(\text{ПУ}i)}^2 + c \cdot \Delta t_{\text{М}(\text{ПУ}i)}^3 + d \cdot \Delta t_{\text{М}(\text{ПУ}i)}^4 + e \cdot \Delta t_{\text{М}(\text{ПУ}i)}^5)], \quad (3.65)$$

$$\Delta t_{\text{М}(\text{ПУ}i)} = t_{\text{М}(\text{ПУ}i)} - 3,9818,$$

$$a = 7,0134 \cdot 10^{-8}, \quad b = 7,926504 \cdot 10^{-6}, \quad c = -7,575677 \cdot 10^{-8},$$

$$d = 7,314894 \cdot 10^{-10}, \quad e = -3,596458 \cdot 10^{-12},$$

$$\text{CTS}_{Mi} = 1 + 3\alpha_{\text{тМ}} \cdot (t_{\text{М}i} - 20), \quad (3.66)$$

$$\text{CTS}_{\text{ПУ}i} = (1 + \alpha_{\text{к1}} \cdot (t_{\text{ПУ}i} - 20)) \cdot (1 + \alpha_{\text{д}} \cdot (t_{\text{д}i} - 20)), \quad (3.67)$$

$$\text{CPS}_{\text{ПУ}i} = 1 + \frac{P_{\text{ПУ}i} \cdot D}{E \cdot S}, \quad (3.68)$$

$$\text{CPL}_{\text{ПУ}i} = \frac{1}{1 - F \cdot P_{\text{ПУ}i}}, \quad (3.69)$$

где  $V_{Mi}$  – объем поверочной жидкости в эталонном мернике при  $i$ -ом измерении, м<sup>3</sup>;

$\text{CTDW}_{Mi}$  – комбинированный коэффициент, учитывающий влияние разности температуры поверочной жидкости в ПУ и в эталонном мернике на объем поверочной жидкости,

определенный для температуры поверочной жидкости в ПУ и в эталонном мернике за время  $i$ -го измерения;

$CTS_{Mi}$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры стенок эталонного мерника на вместимость эталонного мерника при  $i$ -ом измерении;

$CTS_{ПУi}$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры стенок ПУ на вместимость ПУ при  $i$ -ом измерении;

$CPS_{ПУi}$  – коэффициент, учитывающий влияние давления поверочной жидкости на вместимость ПУ при  $i$ -ом измерении;

$CPL_{ПУi}$  – коэффициент, учитывающий влияние давления на объем поверочной жидкости, определенный для давления поверочной жидкости в ПУ за время  $i$ -го измерения;

$V_{Мном}$  – номинальная вместимость эталонного мерника,  $м^3$ ;

$\Delta V_i$  – объем слитой в мерный цилиндр (долитой из мерного цилиндра, с обратным знаком) поверочной жидкости при  $i$ -ом измерении,  $м^3$ ;

$RHO_{Mi}$  – плотность поверочной жидкости в эталонном мернике при  $i$ -ом измерении,  $кг/м^3$ ;

$RHO_{ПУi}$  – плотность поверочной жидкости в ПУ при  $i$ -ом измерении при температуре  $t_{ПУi}$ ,  $кг/м^3$ ;

$P_{ПУi}$  – значение давления поверочной жидкости в ПУ за время  $i$ -го измерения, МПа;

$D$  – внутренний диаметр измерительного участка ПУ (берут из эксплуатационной документации ПУ), мм;

$E$  – модуль упругости материала стенок ПУ (берут из эксплуатационной документации ПУ), МПа;

$S$  – толщина стенок ПУ (берут из эксплуатационной документации ПУ), мм;

$\alpha_{M}$  – коэффициент линейного расширения материала стенок эталонного мерника (берут из эксплуатационной документации эталонного мерника),  $1/^\circ C$ ;

$\alpha_d$  – коэффициент линейного расширения материала планки крепления детекторов ПУ (берут из эксплуатационной документации ПУ),  $1/^\circ C$ ;

$\alpha_{k1}$  – квадратичный коэффициент расширения стали измерительного участка ПУ, (берут из эксплуатационной документации ПУ),  $1/^\circ C$ ;

$t_{ПУi}$  – значение температуры поверочной жидкости в ПУ за время  $i$ -го измерения,  $^\circ C$ ;

$t_{Mi}$  – значение температуры поверочной жидкости в эталонном мернике при  $i$ -ом измерении,  $^\circ C$ ;

$t_{di}$  – температура планки крепления детекторов при  $i$ -ом измерении (при отсутствии датчика температуры берут значение, равное температуре окружающей среды),  $^\circ C$ ;

$F$  – коэффициент сжимаемости воды, равный  $4,64 \times 10^{-4} 1/МПа$ .

Второй метод

Массу поверочной жидкости, вытесненной из измерительного участка ПУ при  $i$ -ом измерении,  $M_{Bi}$ , кг, вычисляют по формуле:

$$M_{Bi} = m_{Bi} \cdot \frac{\left(1 - \frac{\rho_{\text{воз.}i}}{\rho_{\Gamma}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_{\text{воз.}i}}{\rho_{\text{ПУ}i}}\right)}, \quad (3.70)$$

$$\rho_{\text{воз.}i} = 1,223068 \cdot \left(1 - \frac{0,1049869 \cdot h}{1000}\right) \cdot \left(\frac{519,67}{1,8 \cdot t_{\text{воз.}i} + 491,67}\right), \quad (3.71)$$

$$\rho_{\text{ПУ}i} = RHO_{\text{ПУ}i} \quad (3.72)$$

где  $m_{Bi}$  – показание весов при  $i$ -ом измерении, кг ;

$\rho_{\text{воз.}i}$  – плотность воздуха для  $i$ -го измерения, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\Gamma}$  – плотность гирь, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{ПУ}i}$  – плотность поверочной жидкости в ПУ при  $i$ -ом измерении или измеренная в испытательной лаборатории с допускаемой абсолютной погрешностью не более  $\pm 0,1$  кг/м<sup>3</sup>, если в качестве поверочной жидкости используют питьевую воду, кг/м<sup>3</sup>;

$h$  – высота над уровнем моря, м;

$t_{\text{воз.}i}$  – температура воздуха при  $i$ -ом измерении, °С;

Объем поверочной жидкости в ПУ,  $V_{Bi}$ , м<sup>3</sup>, при температуре поверочной жидкости в ПУ при  $i$ -ом измерении массы поверочной жидкости в накопительной емкости, которая равна массе поверочной жидкости в ПУ, вычисляют по формуле:

$$V_{Bi} = \frac{M_{Bi}}{\rho_{\text{ПУ}i}} \quad (3.73)$$

где  $M_{Bi}$  – масса поверочной жидкости в накопительной емкости при  $i$ -ом измерении, кг;

Вместимость ПУ при стандартных условиях, при  $i$ -ом измерении  $V_{0i}$ , м<sup>3</sup>, вычисляют по формулам:

$$V_{0i} = \frac{V_{Bi}}{CCF_{\text{ПУ}i}}, \quad (3.74)$$

$$CCF_{\text{ПУ}i} = CTS_{\text{ПУ}i} \cdot CPS_{\text{ПУ}i} \cdot CPL_{\text{ПУ}i}, \quad (3.75)$$

$$CTS_{\text{ПУ}i} = (1 + \alpha_{kl} \cdot (t_{\text{пу}i} - 20)) \cdot (1 + \alpha_d \cdot (t_{di} - 20)), \quad (3.76)$$

$$CPS_{\text{ПУ}i} = 1 + \frac{P_{\text{ПУ}i} \cdot D}{E \cdot S}, \quad (3.77)$$

$$CPL_{\text{ПУ}i} = \frac{1}{1 - F \cdot P_{\text{ПУ}i}}, \quad (3.78)$$

где  $CCF_{\text{ПУ}i}$  - комбинированный коэффициент, учитывающий влияние температуры и давления поверочной жидкости в ПУ на вместимость измерительного участка ПУ при  $i$ -ом измерении;

$CTS_{\text{ПУ}i}$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры стенок ПУ на вместимость ПУ при  $i$ -ом измерении;

$CPS_{\text{ПУ}i}$  – коэффициент, учитывающий влияние давления поверочной жидкости на вместимость ПУ при  $i$ -ом измерении;

$CPL_{\text{ПУ}i}$  – коэффициент, учитывающий влияние давления на объем поверочной жидкости, определенный для давления поверочной жидкости в ПУ за время  $i$ -го измерения при давлении  $P_{\text{ПУ}i}$ ;

$t_{\text{ПУ}i}$  – значение температуры поверочной жидкости в ПУ за время  $i$ -го измерения, °С.;

$P_{\text{ПУ}i}$  – значение давления поверочной жидкости в ПУ за время  $i$ -го измерения, МПа;

Вместимость ПУ при стандартных условиях  $V_0, \text{ м}^3$ , вычисляют по формуле:

$$V_0 = \frac{\sum_{i=1}^n V_{0i}}{n}, \quad (3.79)$$

где  $n$  – количество измерений.

Оценка среднего квадратического отклонения (СКО) результатов определения вместимости.

СКО результатов определения вместимости ПУ при стандартных условиях,  $S_{V0}, \%$ , вычисляют по формуле:

$$S_{V0} = \frac{1}{V_0} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{0i} - V_0)^2}{n-1}} \cdot 100, \quad (3.80)$$

Проверяют выполнение следующего условия:

$$S_{V0} \leq 0,01\% . \quad (3.81)$$

Если это условие не выполнено, анализируют причины и выявляют промахи. Допускается не более одного промаха из пяти измерений.

После исключения промахов при необходимости количество измерений доводят до значения, не менее пяти.

Определение доверительной относительной погрешности определения вместимости при доверительной вероятности 0,99.

Доверительную относительную погрешность определения вместимости,  $\delta_0$ , %, при доверительной вероятности 0,99, вычисляют по формулам:

$$\delta_0 = t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma}, \quad (3.82)$$

$$t_{\Sigma} = \frac{\Theta + \Theta_{V0}}{S_{\Theta} + S}, \quad (3.83)$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S^2 + S_{\Theta}^2}, \quad \text{для} \quad (3.84)$$

$$\Theta = \begin{cases} \pm 1,4 \cdot \sqrt{\Theta_M^2 + \Theta_{CTDW_M}^2 + \Theta_{CTS_M}^2 + \Theta_{CTS_{ПУ}}^2 + \Theta_{CPS_{ПУ}}^2 + \Theta_{CPL_{ПУ}}^2} & \text{для} \\ \pm 1,4 \cdot \sqrt{\Theta_B^2 + \Theta_{\rho_{ПУ}}^2 + \Theta_{CTS_{ПУ}}^2 + \Theta_{CPS_{ПУ}}^2 + \Theta_{CPL_{ПУ}}^2} & \text{для} \end{cases}, \quad (3.85)$$

$$\Theta_{V0} = t_{0,99} \cdot S, \quad \text{для} \quad (3.86)$$

$$S_{\Theta} = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (\Theta_M^2 + \Theta_{CTDW_M}^2 + \Theta_{CTS_M}^2 + \Theta_{CTS_{ПУ}}^2 + \Theta_{CPS_{ПУ}}^2 + \Theta_{CPL_{ПУ}}^2)} & \text{для первого} \\ \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (\Theta_B^2 + \Theta_{\rho_{ПУ}}^2 + \Theta_{CTS_{ПУ}}^2 + \Theta_{CPS_{ПУ}}^2 + \Theta_{CPL_{ПУ}}^2)} & \text{для второго} \end{cases} \quad (3.87)$$

$$S = \frac{S_{V0}}{\sqrt{n}}, \quad \text{для} \quad (3.88)$$

где  $t_{\Sigma}$  – коэффициент для определения доверительной границы погрешности ПУ;

$S_{\Sigma}$  – СКО суммы неисключенной систематической и случайной погрешностей, %;

$\Theta$  – граница неисключенной систематической погрешности ПУ, %;

$\Theta_{V0}$  – граница случайной составляющей погрешности определения среднего значения вместимости ПУ, %;

$S_{\Theta}$  – СКО суммы неисключенных систематических погрешностей, %;

$S$  – СКО среднего значения результатов определения вместимости ПУ, %;

$\Theta_M$  – граница составляющей неисключенной систематической погрешности определения вместимости ПУ, обусловленная погрешностью эталонного мерника ( $\Theta_M = 0,01\%$ ), %;

$\Theta_{CTDW_M}$  – граница составляющей неисключенной систематической погрешности определения вместимости ПУ, обусловленная погрешностью определения комбинированного коэффициента  $CTDW_M$ , учитывающего влияние разности температуры поверочной жидкости в ПУ и в эталонном мернике ( $\Theta_{CTDW_M} = 0,008\%$ ), %;



$\Theta_{\text{СТСМ}}$  – граница составляющей неисключенной систематической погрешности определения вместимости ПУ, обусловленная погрешностью определения коэффициента  $\text{СТСМ}$ , учитывающего влияние температуры стенок эталонного мерника на вместимость эталонного мерника ( $\Theta_{\text{СТСМ}} = 0,001\%$ ), %;

$\Theta_{\text{СТСПУ}}$  – граница составляющей неисключенной систематической погрешности определения вместимости ПУ, обусловленная погрешностью определения коэффициента  $\text{СТСПУ}$ , учитывающего влияние температуры стенок ПУ на вместимость ПУ ( $\Theta_{\text{СТСПУ}} = 0,001\%$ ), %;

$\Theta_{\text{СПСПУ}}$  – граница составляющей неисключенной систематической погрешности определения вместимости ПУ, обусловленная погрешностью определения коэффициента  $\text{СПСПУ}$ , учитывающего влияние давления поверочной жидкости на вместимость ПУ ( $\Theta_{\text{СПСПУ}} = 0,001\%$ ), %;

$\Theta_{\text{СРЛПУ}}$  – граница составляющей неисключенной систематической погрешности определения вместимости ПУ, обусловленная погрешностью определения коэффициента  $\text{СРЛПУ}$ , учитывающего влияние давления на объем поверочной жидкости в ПУ ( $\Theta_{\text{СРЛПУ}} = 0,0001\%$ ), %;

$\Theta_{\text{В}}$  – граница составляющей неисключенной систематической погрешности определения вместимости ПУ, обусловленная погрешностью эталонных весов ( $\Theta_{\text{В}} = 0,005\%$ ), %;

$\Theta_{\text{РПУ}}$  – граница составляющей неисключенной систематической погрешности определения вместимости ПУ, обусловленная погрешностью определения плотности воды в ПУ ( $\Theta_{\text{РПУ}} = 0,006\%$  - при вычислении плотности воды или  $\Theta_{\text{РПУ}} = 0,01\%$  - при измерении плотности воды в испытательной лаборатории), %;

$t_{0,99}$  – коэффициент Стьюдента для вероятности  $P = 0,99$ .

Определение доверительной относительной погрешности ПУ при воспроизведении объема при доверительной вероятности 0,99.

За доверительную относительную погрешность ПУ при воспроизведении объема,  $\delta_{\text{ПУ}}$ , %, при доверительной вероятности 0,99, принимают доверительную относительную погрешность определения вместимости ПУ при доверительной вероятности 0,99:

$$\delta_{\text{ПУ}} = \delta_0 \quad (3.89)$$

Проверяют выполнение условия:

$$\delta_0 \leq 0,03\% \quad (3.90)$$

Проверка отсутствия протечек. Регулятором расхода устанавливают значение расхода  $Q_2$ , выбранное для калибровки отсутствия протечек. Выполняют три измерения в зависимости от используемого метода калибровки. Определяют вместимость измерительного участка ПУ при стандартных условиях  $V_0^{\text{Прот}}$  м<sup>3</sup>, в зависимости от используемого метода калибровки.

Определяют относительное отклонение вместимости измерительного участка ПУ  $V_0^{\text{Прог}}$  от значения, полученного при определении метрологических характеристик ПУ,  $\delta_v$ , %, по формуле:

$$\delta_v = \frac{V_0^{\text{Прог}} - V_0}{V_0} \cdot 100. \quad (3.91)$$

Проверяют выполнение условия:

$$|\delta_0| \leq 0,35 \% \times 0,03 \%. \quad (3.92)$$

При невыполнении условия (3.92) проводят анализ результатов измерений.

Если  $\delta_0 > +0,35 \% \times 0,03 \%$ , то это свидетельствует о наличии протечек поверочной жидкости в технологической схеме поверки и необходимости их устранения.

Если  $\delta_0 < -0,35 \% \times 0,03 \%$ , то это свидетельствует о допущенных ошибках при выполнении измерений и необходимости повторения измерений после устранения причин, вызвавших ошибки.

Суммарная стандартная неопределенность [46, 75]:

$$u_c = \sqrt{S_{V_0}^2 + \frac{\theta_M^2 + \theta_t^2}{3}}. \quad (3.93)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,95 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) [46, 75]:

$$U(0,95) = 2u_c. \quad (3.94)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,99 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) [46, 75]:

$$U(0,99) = 3u_c. \quad (3.95)$$

### 3.5 Выводы по главе 3

1. Результаты исследований, отраженные в методиках, разработанных с применением правил [46, 60, 61, 63, 71, 72, 73, 74, 75] показывают:

- поверка поверочных установок с высокого класса точности с погрешностью не более  $\pm 0,03 \%$ , возможна только при условии применения весов ВСПМ с погрешностью измерений массы не более  $\pm 0,005 \%$  и измерений температуры рабочей жидкости с погрешностью не более  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- результаты измерений доказали возможность получения метрологических характеристик эталонного мерника с погрешностью  $\pm 0,007 \%$  и эталонных поверочных установок с погрешностью  $\pm 0,025 \dots 0,03 \%$  по разработанным методикам;

- результаты измерений доказали возможность разработки исходного эталона для измерений объема углеводородных жидкостей с погрешностью  $\pm 0,03$  %;

- результаты измерений доказали возможность разработки мобильной эталонной поверочной установки с точностью  $\pm 0,025 \dots 0,03$  % для выполнения поверки стационарных поверочных установок на месте эксплуатации с погрешностью  $\pm 0,05$  %;

2. Для целей метрологического обеспечения исходного эталона ЗАО «Нефтегазметрология» [46], предназначенного для измерений массы и объема углеводородных жидкостей, построенного на основе СИ с исследованными метрологическими характеристиками, необходимо разработать новые методики поверки и разработать локальную поверочную схему передачи единицы величин от ГПЭ эталонов массы и силы, чему посвящена Глава 4 настоящей диссертационной работы.

## Глава 4. Методика передачи единиц величин от исходного эталона рабочим средствам измерений

### 4.1 Определение метрологических характеристик специальных весов

Единица массы передается специальным весам ВСПМ [46, 71] от рабочего эталона единицы массы 3-го разряда по ГОСТ 8.021-2005 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений массы» [24] или рабочего эталона силы по ГОСТ Р 8.663-2009 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений силы» [26] с пределом допускаемой относительной погрешности  $\pm 0,002$  %. При использовании рабочего эталона силы к весам прикладывается эквивалентное массе воздействие силы с учетом ускорения свободного падения на месте калибровки.

В результате проведенных исследований при нагрузках 320 и 1320 кг была получена расширенная неопределенность весов ВСПМ 0,046 кг, что в относительных единицах составляет  $\pm 0,003$  %. При нагрузках 500 и 1000 кг, была получена расширенная неопределенность весов 0,05 кг, что в относительных единицах составило  $\pm 0,004$  %.

В результате проведенной оценки [32, 37, 71], полученные пределы погрешностей весов при нагрузках 320, 500, 1000 и 1320 кг не превысили значения  $\pm 0,005$  %.

### 4.2 Определение метрологических характеристик эталонного мерника

Расчет доверительной границы суммарной погрешности и суммарной стандартной и расширенной неопределенностей [12] для мерников 1000 дм<sup>3</sup> [46, 72]:

Расширенная неопределенность вместимости мерника 1000 дм<sup>3</sup> (при  $k = 2$ ):

$$U(V_{20}) = 2 \cdot 0,037 = 0,074 \text{ дм}^3, \quad (4.1)$$

$$W(V_{20}) = 0,0074 \% \quad . \quad (4.2)$$

Полученные значения  $W(V_g) = 0,0002$  % расширенной неопределенности вместимости горловины мерника 1000 дм<sup>3</sup> и  $W(V_g) = 0,00015$  % для мерника 20 дм<sup>3</sup>, в дальнейших расчетах не учитываем из-за малой величины, которая не влияет на полученный результат.

Полученные пределы погрешностей мерников не превысили  $\pm 0,0074$  %.

### 4.3 Определение метрологических характеристик поверочных установок

#### 4.3.1 Трубопоршневая поверочная установка

##### 4.3.1.1 Передача единицы объема ТПУ [46, 74]

Доверительные границы суммарной погрешности  $\Delta(0,95)=0,018$  %,  $\Delta(0,99)=0,024$  %.

Бюджет неопределенности единицы объема ТПУ представлен в таблице 4.1.

**Таблица 4.1** Бюджет неопределенности единицы объема ТПУ [46, 74]

Источники стандартной неопределенности	Значение, %
----------------------------------------	-------------

Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу А, возникающая при определении среднего значения вместимости ТПУ (СКО случайной погрешности определения среднего значения вместимости ТПУ $S_{V_0}$ при числе измерений 11)	0,003
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу А, возникающая при определении среднего значения коэффициента преобразования счетчика-компаратора (СКО случайной погрешности определения среднего значения коэффициента преобразования счетчика-компаратора $S_{Ксч}$ при числе измерений 10)	0,003
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения вместимости мерника $\left(\frac{\theta_M}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,01}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения температуры $\left(\frac{\theta_{t1}}{\sqrt{3}}, \frac{\theta_{t2}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,0037}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения количества импульсов от счетчика-компаратора $\left(\frac{\theta_{ИБК_N}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,005}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения коэффициента преобразования счетчика-компаратора в точке диапазона расхода, при котором определяют вместимость ТПУ $\left(\frac{\theta_{ИБК_{Ксч}}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,005}{\sqrt{3}}$

Суммарная стандартная неопределенность [46, 74]:

$$u_c = \sqrt{S_{Ксч}^2 + S_{V_0}^2 + \frac{\theta_M^2 + \theta_{t1}^2 + \theta_{t2}^2 + \theta_{ИБК_N}^2 + \theta_{ИБК_{Ксч}}^2}{3}} = 0,009 \%. \quad (4.3)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,95 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) [46, 74]:

$$U(0,95) = 2u_c = 0,018 \%. \quad (4.4)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,99 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) [46, 74]:

$$U(0,99) = 3u_c = 0,027 \%. \quad (4.5)$$

#### 4.3.1.2 Передача единицы массы ТПУ

Доверительные границы суммарной погрешности:

$$\Delta(0,95)=0,043 \%, \Delta(0,99)=0,056 \%.$$

(4.6)

Бюджет неопределенности единицы массы ТПУ представлен в таблице 4.2.

**Таблица 4.2** Бюджет неопределенности единицы массы ТПУ [46, 74]

Источники стандартной неопределенности	Значение, %
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу А, возникающая при определении среднего значения вместимости ТПУ (СКО случайной погрешности определения среднего значения вместимости ТПУ $S_{V_0}$ при числе измерений 11)	0,003
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу А, возникающая при определении среднего значения коэффициента преобразования счетчика-компаратора (СКО случайной погрешности определения среднего значения коэффициента преобразования счетчика-компаратора $S_{Ксч}$ при числе измерений 10)	0,003
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения вместимости мерника $\left(\frac{\theta_M}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,01}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения температуры $\left(\frac{\theta_{t1}}{\sqrt{3}}, \frac{\theta_{t2}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,0037}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения количества импульсов от счетчика-компаратора $\left(\frac{\theta_{ИВК_N}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,005}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения коэффициента преобразования счетчика-компаратора в точке диапазона расхода, при котором определяют вместимость ТПУ $\left(\frac{\theta_{ИВК_{Ксч}}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,005}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения плотности $\left(\frac{G \cdot \theta_\rho}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,996 \cdot 0,023}{\sqrt{3}}$

Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения температуры при измерении плотности $\left(\frac{G \cdot \beta \cdot 100 \cdot \Delta T_{\rho}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,996 \cdot 0,00119 \cdot 100 \cdot 0,1}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения температуры при измерении объема $\left(\frac{\beta \cdot 100 \cdot \Delta T_V}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,00119 \cdot 100 \cdot 0,1}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного вычисления массы, осуществляемого ИВК $\left(\frac{\theta_{ИВК_M}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,02}{\sqrt{3}}$

Суммарная стандартная неопределенность [46, 74]:

$$u_c = \sqrt{S_{Kсч}^2 + S_{V0}^2 + \frac{\theta_M^2 + \theta_{t1}^2 + \theta_{t2}^2 + \theta_{ИВК_N}^2 + \theta_{ИВК_{Ксч}}^2 + G^2 \cdot (\theta_{\rho}^2 + \beta^2 \cdot 10^4 \cdot \Delta T_{\rho}^2) + \beta^2 \cdot 10^4 \cdot \Delta T_V^2 + \theta_{ИВК_M}^2}{3}}$$

$$= 0,022 \text{ \%}.$$

(4.7)

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,95 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) [46, 74]:

$$U(0,95) = 2u_c = 0,044 \text{ \%}.$$

(4.8)

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,99 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) [46, 74]:

$$U(0,99) = 3u_c = 0,066 \text{ \%}.$$

(4.9)

### 4.3.2 Компакт-прувер

#### 4.3.2.1 Передача единицы объема КП [46, 75]

Доверительные границы суммарной погрешности:

$$\Delta(0,95) = 0,017 \text{ \%}, \Delta(0,99) = 0,022 \text{ \%}.$$

(4.10)

Бюджет неопределенности единицы объема КП, таблица 4.3.

**Таблица 4.3** Бюджет неопределенности единицы объема КП [46, 75]

Источники стандартной неопределенности	Значение, %
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу А, возникающая при определении среднего значения вместимости	0,006

компакт-прувера (СКО случайной погрешности определения среднего значения вместимости компакт-прувера $S_{V_0}$ при числе измерений 7)	
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения вместимости мерника $\left(\frac{\theta_M}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,01}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения температуры $\left(\frac{\theta_t}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,0037}{\sqrt{3}}$

Суммарная стандартная неопределенность [46, 75]:

$$u_c = \sqrt{S_{V_0}^2 + \frac{\theta_M^2 + \theta_t^2}{3}} = 0,008 \%. \quad (4.11)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,95 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) [46, 75]:

$$U(0,95) = 2u_c = 0,017 \%. \quad (4.12)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,99 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) [46, 75]:

$$U(0,99) = 3u_c = 0,025 \%. \quad (4.13)$$

#### 4.3.2.2 Передача единицы массы КП

Доверительные границы суммарной погрешности  $\Delta(0,95) = 0,044 \%$ ,  $\Delta(0,99) = 0,059 \%$ .

(4.14)

Бюджет неопределенности единицы массы КП представлен в таблице 4.4.

**Таблица 4.4** Бюджет неопределенности единицы массы КП [46, 75]

Источники стандартной неопределенности	Значение, %
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу А, возникающая при определении среднего значения вместимости компакт-прувера (СКО случайной погрешности определения среднего значения вместимости компакт-прувера $S_{V_0}$ при числе измерений 7)	0,006
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения вместимости мерника $\left(\frac{\theta_M}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,01}{\sqrt{3}}$



Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения температуры $\left(\frac{\theta_t}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,0037}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения плотности $\left(\frac{G \cdot \theta_\rho}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,996 \cdot 0,023}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения температуры при измерении плотности $\left(\frac{G \cdot \beta \cdot 100 \cdot \Delta T_\rho}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,996 \cdot 0,00119 \cdot 100 \cdot 0,1}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного определения температуры при измерении объема $\left(\frac{\beta \cdot 100 \cdot \Delta T_V}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,00119 \cdot 100 \cdot 0,1}{\sqrt{3}}$
Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу В, возникающая из-за неточного вычисления массы, осуществляемого ИВК $\left(\frac{\theta_{ИВКМ}}{\sqrt{3}}\right)$	$\frac{0,02}{\sqrt{3}}$

Суммарная стандартная неопределенность [46, 75]:

$$u_c = \sqrt{S_{V0}^2 + \frac{\theta_M^2 + \theta_t^2 + G^2 * (\theta_\rho^2 + \beta^2 * 10^4 * \Delta T_\rho^2) + \beta^2 * 10^4 * \Delta T_V^2 + \theta_{ИВКМ}^2}{3}} = 0,022 \%. \quad (4.15)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,95 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) [46, 75]:

$$U(0,95) = 2u_c = 0,043 \%. \quad (4.16)$$

Расширенная неопределенность для уровня доверия 0,99 для нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) [46, 75]:

$$U(0,99) = 3u_c = 0,065 \%. \quad (4.17)$$

### 4.3.3 Фактические МХ весов, мерников и поверочных установок

Суммарная стандартная неопределенность результатов определения массы весами ВСПМ при уровне доверия 0,95 нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) составила  $\pm 0,003 \dots 0,004 \%$ .

Суммарная стандартная неопределенность результатов определения вместимости мерника при уровне доверия 0,95 нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) составила  $\pm 0,0005 \dots 0,0074$  %.

Расширенная неопределенность объема для ТПУ при уровне доверия 0,95 нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) составила  $U(0,95) = 2u_c = 0,018$  % и для уровня доверия 0,99 нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) составила  $U(0,99) = 3u_c = 0,027$  %.

Расширенная неопределенность массы для ТПУ при уровне доверия 0,95 нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) составила  $U(0,95) = 2u_c = 0,044$  % и для уровня доверия 0,99 нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) составила  $U(0,99) = 3u_c = 0,066$  %.

Расширенная неопределенность объема для КП при уровне доверия 0,95 нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2) составила  $U(0,95) = 2u_c = 0,017$  % и для уровня доверия 0,99 нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) составила  $U(0,99) = 3u_c = 0,025$  %.

Расширенная неопределенность массы для КП при уровне доверия 0,95 нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 2)  $U(0,95) = 2u_c = 0,043$  % и для уровня доверия 0,99 нормального закона распределения результатов измерений (коэффициент охвата равен 3) составила  $U(0,99) = 3u_c = 0,065$  %.

Результаты экспериментальных исследований на практике доказали возможность получения высоких метрологических характеристик, что позволило разработать локальную поверочную схему передачи единицы измерений от рабочих эталонов массы и силы к эталонам и рабочим средствам измерений.

#### **4.4 Передача единиц величин от ГПЭ массы и силы средствам измерений поверочного комплекса**

Поверочный комплекс ЗАО «Нефтегазметрология» выполняет воспроизведение и передачу размера единицы величин массы и объема [15, 17, 46] при испытаниях, градуировке и поверке эталонных мерников 1-го разряда по ГОСТ 8.682 –2009 [27], рабочих эталонов: трубопоршневых установок 1-го и 2-го разрядов, компакт-пруверов 1-го разряда, преобразователей объемного и массового расхода, рабочих средств измерений: преобразователей объемного и массового расхода, счетчиков жидкости по ГОСТ 8.510-2002 [19], ГОСТ 8.595-2004 [21], ГОСТ 8.142-2013 [33].

Эталонные средства измерений в составе поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» [46]:

1. Весы специальные ВСПМ, НПВ 1500 кг, диапазон измерений массы нетто от 200 до 1000 кг, допускаемые доверительные границы суммарной погрешности при измерении массы нетто, при номинальном значении массы нетто 1000 кг не превышает  $\pm 0,005 \%$ , при доверительной вероятности  $P = 0,95$ , дискретность 10 г;

2. Эталонные мерники, номинальной вместимостью 1000 дм<sup>3</sup> и 20 дм<sup>3</sup>, допускаемые доверительные границы суммарной погрешности  $\pm 0,01 \%$ , при доверительной вероятности  $P = 0,95$ ;

3. ТПУ с рабочим диапазоном расхода от 20 до 800 м<sup>3</sup>/ч, с доверительными границами суммарной погрешности при передаче от ТПУ единицы объема (при доверительной вероятности  $0,95 / 0,99$ )  $\pm 0,02 \%$  /  $\pm 0,03 \%$ , доверительными границами суммарной погрешности при передаче от ТПУ единицы массы с применением СИ измерений плотности (при доверительной вероятности  $0,95 / 0,99$ )  $\pm 0,05 \%$  /  $\pm 0,07 \%$ ;

4. ТПУ с рабочим диапазоном расхода от 100 до 2200 м<sup>3</sup>/ч, с доверительными границами суммарной погрешности при передаче от ТПУ единицы объема (при доверительной вероятности  $0,95 / 0,99$ )  $\pm 0,02 \%$  /  $\pm 0,03 \%$ , доверительными границами суммарной погрешности при передаче от ТПУ единицы массы с применением СИ измерений плотности (при доверительной вероятности  $0,95 / 0,99$ )  $\pm 0,05 \%$  /  $\pm 0,07 \%$ .

5. ПУ КП с рабочим диапазоном расхода от 0,057 до 57 м<sup>3</sup>/ч, доверительными границами суммарной погрешности при передаче от КП единицы объема (при доверительной вероятности  $0,095 / 0,99$ )  $\pm 0,02 \%$  /  $\pm 0,03 \%$  и доверительными границами суммарной погрешности при передаче от КП единицы массы с применением СИ измерений плотности (при доверительной вероятности  $0,095 / 0,99$ )  $\pm 0,05 \%$  /  $\pm 0,07 \%$ .

Принципы передачи размеров единиц локальной поверочной схемы СТО НГМ 1.1-2014 [46], рис. 4.2 (пунктиром выделены эталонные средства измерений в составе поверочного комплекса) обеспечивают передачу единицы величин [25] от Государственных эталонов массы [24], силы [26] и плотности [18] эталонным и рабочим средствам измерений массы и объема, что полностью соответствует Государственным поверочным схемам:

- ГОСТ 8.021- 2005 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений массы» [24];

- ГОСТ Р 8.663-2009 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений силы» [26] (эквивалентное массе гирь воздействие силы с учетом ускорения свободного падения на месте эксплуатации);

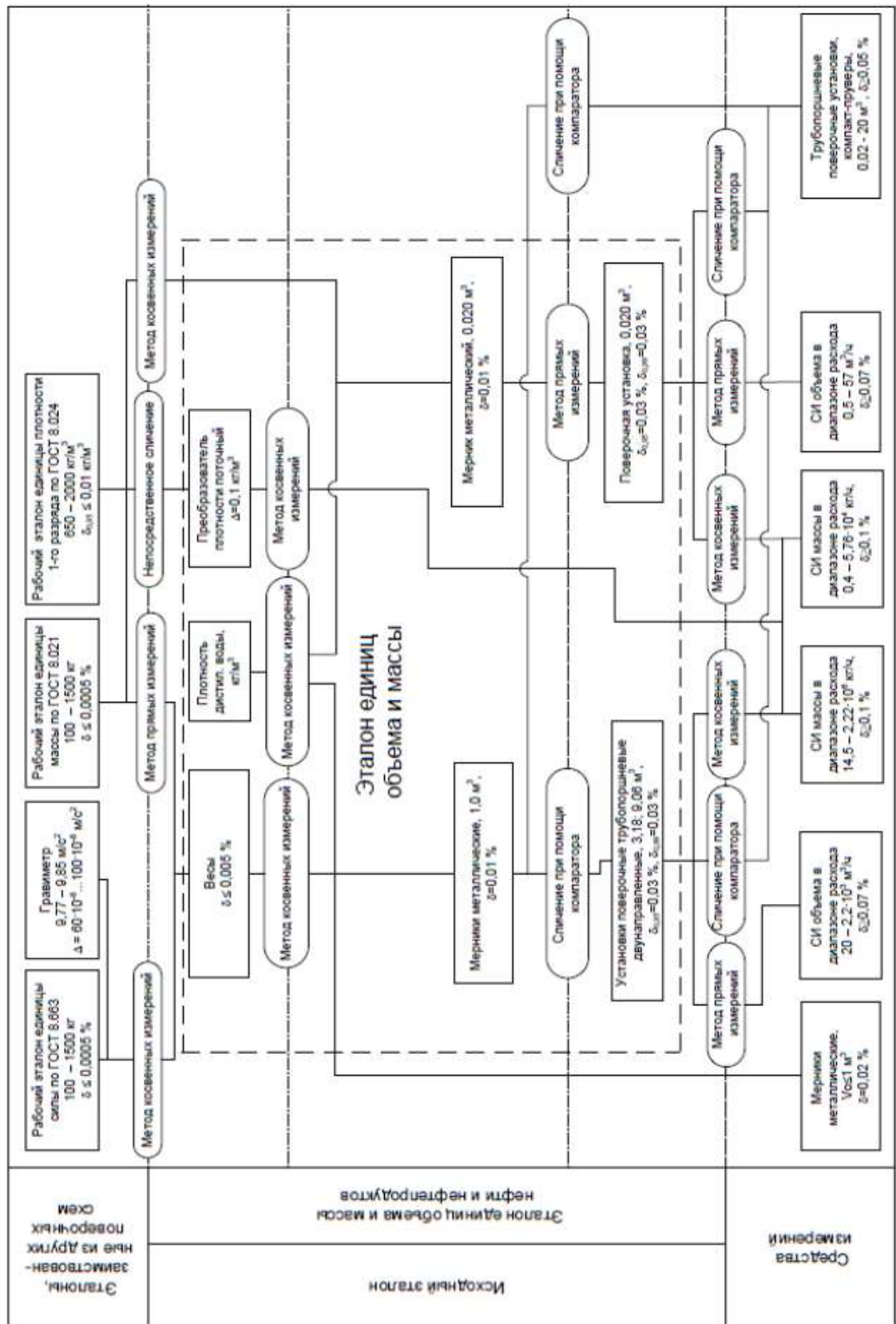


Рис.4.2 Локальная поверочная схема поверочного комплекса  
ЗАО «Нефтегазметрология» [46].

- ГОСТ 8.024-2002 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений плотности» [18];

- ГОСТ 8.510-2002 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объема и массы жидкости» [19];

- ГОСТ 8.142-2013 «ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений массового и объемного расхода (массы и объема жидкости» [33].

Реализованная на практике локальная поверочная схема СТО НГМ 1.1-2014 ЗАО «Нефтегазметрология» [46] обеспечивает поверку:

- эталонных мерников 1-го разряда;
- рабочих эталонов: трубопоршневых установок 1-го и 2-го разрядов, компакт-пруверов 1-го разряда, преобразователей объемного и массового расхода;
- рабочих средств измерений: преобразователей объемного и массового расхода, счетчиков жидкости в диапазоне расходов [21].

#### **4.5 Выводы по главе 4**

1. Результаты исследований доказали прослеживаемость метрологических характеристик от ГПЭ массы и силы к СИ поверочного комплекса, что позволило построить поверочную схему передачи единиц величин массы и объема на базе исходного эталона ЗАО «Нефтегазметрология» [46].

2. Разработанная методика передачи единицы величин от ГПЭ и эталонных средств к рабочим средствам измерений и поверочным установкам массы и объема реализована при проектировании и изготовлении Белгородского поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» и оформлена стандартом предприятия СТО НГМ 1.1-2014 [46].

3. При расчете неопределенности измерений использовался алгоритм [46], который позволил оптимизировать условия измерений и учесть факторы, влияющие на точность измерений [52].

4. Полученные результаты расчетов доверительной суммарной погрешности, стандартной и расширенной неопределенности доказали правильность применения разработанных методик [71, 72, 73, 74, 75].

5. Разработанная локальная поверочная схема обеспечивает выполнение поверки эталонных мерников 1-го разряда, рабочих эталонов массы и объема 1-го и 2-го разрядов, рабочих средств измерений массы и объема [46].

6. Применение на практике принципов, заложенных в локальной поверочной схеме поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» [46] обеспечат достоверные измерения

количества жидких углеводородов с помощью СИКН и СИКНП и позволяют уменьшить вероятность брака поверки рабочих средств измерений.

## **Глава 5. Внедрение в практику результатов работы**

### **5.1 Совершенствование МО измерений при поверке весов, эталонных мерников и поверочных установок**

Экспериментальные исследования методик измерений массы и вместимости эталонных мерников, описанные в диссертационной работе, заложенные в основу метода измерений массы на базе специальных весов ВСПМ [46], проводились на протяжении 20-ти лет. Задачей проведенных за эти годы исследований было совершенствование метрологического обеспечения калибровочных и поверочных работ эталонных мерников 1-го разряда, от погрешностей которых напрямую зависят измерения массы и объема углеводородных жидкостей. Сначала была использована методика определения вместимости мерников с применением компаратора и балластных грузов  $M_1$ , которая позволила значительно снизить финансовые затраты для обеспечения этих измерений, отказавшись от применения гирь классов  $F_2$  и  $F_1$ . Кроме этого, гири  $F_2$  и  $F_1$  не изготавливались в форме параллелепипеда, что не давало возможности устанавливать их друг на друга на весах при наборе нагрузок более 500 кг. Такая методика была описана в метрологических журналах, в различных методиках поверки и представлена на метрологических конференциях [44, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 86, 87, 88]. Требования для ГОСТ Р 8.682-2009 «Мерники металлические эталонные. Методика поверки» [27] установили применение весов с погрешностью не более  $\pm 0,005$  %. Для обеспечения достоверных измерений массы и объема нефти требуется поверочные установки высокого класса точности, с погрешностями меньше  $\pm 0,05$  %. Для решения этих задач и потребовались новые методики на базе отечественных весов, отвечающих этим требованиям. Исследования весов велась на протяжении 2-х лет, полученный положительный результат позволил применить такие весы для поверки эталонных мерников на заводе ООО «СНГБ» в г. Калининград, выполнить поверку поверочных установок высокого класса точности из состава поверочного комплекса калибровочной станции ЗАО «Нефтегазметрология» в г. Белгород. Результаты внедрения были представлены на метрологических конференциях [81, 82, 83, 84, 86, 87, 88], результаты исследований были опубликованы в 2014 году [45]. Положительные результаты исследований позволили разработать новые методики поверки, эталонные средства измерений высокого класса точности, локальную поверочную схему для средств измерений массы и объема и внедрить при изготовлении поверочного комплекса.

### **5.2 Внедрение результатов работы в ЗАО «Нефтегазметрология»**

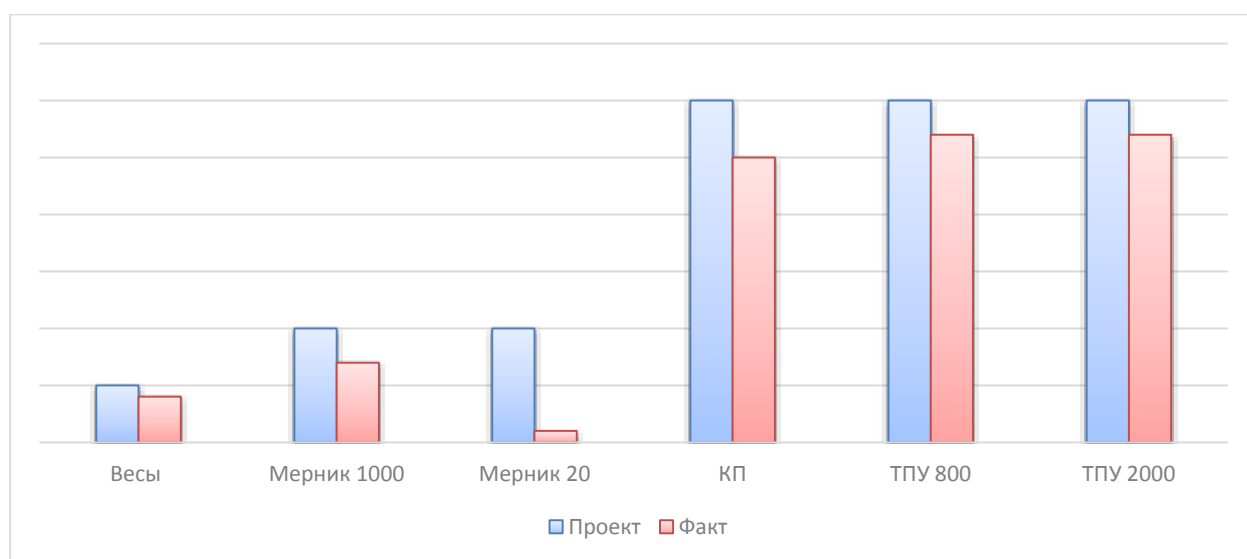
Поверочный комплекс ЗАО «Нефтегазметрология» предназначен для хранения и передачи единиц объема и массы жидкости при калибровке, градуировке и поверке средств измерений по ГОСТ 8.510-2002 [19] и ГОСТ 8.142-2013 [33] преобразователей объемного и массового расхода,

счетчиков жидкости, компакт-пруверов, трубопоршневых поверочных установок (ТПУ) 1-го и 2-го разрядов [46, 69].

Метрологические характеристики эталонных средств измерений составе поверочного комплекса, представлены в таблице 5.1 и на рисунке 5.1.

**Таблица 5.1** Метрологические характеристики эталонных средств измерений ПК

Наименование эталона	Показатели точности по проекту	Показатели точности, % / уровень вероятности, полученные при экспериментальных исследованиях / коэффициент охвата
Весы ВСПМ	$\pm 0,005 \%$	$\pm 0,003 \dots 0,004 / 0,95 / 2$
Мерник эталонный $1 \text{ м}^3$	$\pm 0,01 \%$	$\pm 0,0074 / 0,95 / 2$
Мерник эталонный $0,02 \text{ м}^3$	$\pm 0,01 \%$	$\pm 0,0005 / 0,95 / 2$
КП	$\pm 0,03 \%$	$\pm 0,017 / 0,95 / 2$ $\pm 0,025 / 0,99 / 3$
ТПУ	$\pm 0,03 \%$	$\pm 0,018 / 0,95 / 2$ $\pm 0,027 / 0,99 / 3$



**Рис. 5.1** Сравнение метрологических характеристик эталонов, входящих в ПК

Высокие метрологические характеристики описанные в таблице 5.1 и представленные на рисунке 5.1 эталонных средств измерений легли в основу уникального поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» [46].

Диапазоны расходов ПУ: ТПУ - 800 от 20 до 800  $\text{м}^3/\text{ч}$ , ТПУ - 2200 от 100 до 2200  $\text{м}^3/\text{ч}$ , ПУ КП от 0,057 до 57  $\text{м}^3/\text{ч}$ .



Блок измерительных линий (БИЛ), состоящий из трех измерительных линий (ИЛ): ИЛ1 Ду 80, ИЛ2 Ду 150, ИЛ3 Ду 250 предусматривает установку ПР с Ду от 25 до 500 мм.

Узел измерений параметров качества рабочей среды (УИК) оснащен преобразователем плотности жидкости измерительным (ПП) с пределами допускаемой основной абсолютной погрешности  $\pm 0,1 \text{ кг/м}^3$  [73] и преобразователя плотности и вязкости жидкости измерительным с пределами допустимой основной абсолютной погрешности при преобразовании динамической вязкости  $\pm 1,0 \%$  от полной шкалы диапазона [46].

УИК оснащен узлом подключения пикнометрической установки с пределами допускаемой абсолютной погрешности  $\pm 0,1 \text{ кг/м}^3$  [46].

Система сбора и обработки информации в составе ИВК «ИМЦ-07» с функцией резервирования, заявленными пределами допускаемой относительной погрешности  $\pm 0,005 \%$  при преобразовании параметров электрических сигналов в значения коэффициента преобразования преобразователей объемного расхода при определении метрологических характеристик по ТПУ и КП, коэффициента преобразования, коэффициента коррекции, градуировочного коэффициента преобразователей массового расхода при определении метрологических характеристик по ТПУ или КП и ПП, массы жидкости по ТПУ или КП и ПП; программируемого логического контроллера; системы видеонаблюдения и охранно-пожарной сигнализации; автоматизированного рабочего места оператора; автоматизированного рабочего места технолога [46].

Технические характеристики поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» и рабочей жидкости приведены в таблице 5.2.

**Таблица 5.2** Технические характеристики поверочного комплекса и рабочей жидкости [46]

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерений объемного расхода, м <sup>3</sup> /ч	от 0,5 до 2200 (4400*)
Диапазон измерений массового расхода, т/ч (с учетом значений плотности рабочей жидкости при 20 °С)	от 0,4 до 1958
Рабочая среда	керосин, дизельное топливо, масло, другие жидкие углеводороды
Диапазон температуры рабочей жидкости, °С	от 5 до 45
Давление рабочей жидкости, МПа, не более	1,6
Плотность рабочей жидкости при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	от 750 до 1000
Вязкость кинематическая рабочей жидкости, мм <sup>2</sup> /с (сСт)	от 0,5 до 150
Диапазон температуры окружающей жидкости, °С	от 10 до 30
Режим работы	периодический, не более 20 ч в сутки

\* - технологическая обвязка предусматривает расширение диапазона расходов до 4400 м<sup>3</sup>/ч.

Результаты метрологической экспертизы, проведенной ФГУП «ВНИИМ» и ФГУП «ВНИИР», в 2014 г. подтверждают следующее:

1. Передача единицы массы весам поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» обеспечивается от ГПЭ массы ГЭТ 3-2008 и рабочего эталона силы 3-го разряда.

2. Технический проект поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» соответствует требованиям:

– ГОСТ 8.510-2002 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объема и массы жидкости» [23];

– ГОСТ Р 53228-2008 «Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания» [29];

– ГОСТ 8.021-2005 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений массы» [27].

3. Метрологические термины и наименования измеряемых величин, используемые в техническом проекте, соответствуют требованиям РМГ 29-99 «Рекомендация по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» [3].

4. Единицы измеряемых величин соответствуют требованиям ГОСТ 8.417-2002 «ГСИ. Единицы величин» [15].

### **5.3 Назначение поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология»**

1. Поверочный комплекс ЗАО «Нефтегазметрология» [46] предназначен для хранения и передачи единиц объема и массы жидкости при градуировке и поверке средств измерений по ГОСТ 8.510-2002 [23] и ГОСТ 8.142-2013 [33] преобразователей объемного и массового расхода, счетчиков жидкости, компакт-пруверов, трубопоршневых поверочных установок (ТПУ) 1-го и 2-го разрядов при выпуске из производства, при первичных и периодических поверках [[http://www.imsholding.ru/kalibrovochnyj\\_centr\\_neftegazmetrologija/](http://www.imsholding.ru/kalibrovochnyj_centr_neftegazmetrologija/)].

2. Применение на практике принципов, заложенных в локальной поверочной схеме поверочного комплекса [46], позволит обеспечить достоверные измерения количества жидких углеводородов на СИКН и СИКНП, позволит уменьшить вероятность брака поверки эталонов и рабочих средств измерений (номера государственного реестров СИ 44252-10, 44963-10, 49450-12, 57471-14, 56812-14 и т.д.).

3. Высокие метрологические характеристики поверочного комплекса позволят провести международные сличения и получить метрологическую аккредитацию в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии, ведущих метрологических институтов мира (VSL, NMi) [79, 80], что даст признание результатов измерений, выполненных на территории РФ,

позволят провести процедуру испытаний по типу ГПЭ [31], что обеспечит легитимность проводимых измерений и испытаний, в том числе и при поставках углеводородных жидкостей за пределы РФ, включая отгрузку трубопроводным транспортом, морскими и речными танкерами [43, 44]. Пример сертификата утверждения типа, оформленный НМИ NMI (Нидерланды) [79] на СИКН производства ООО «СНГБ», оформленный по результатам испытаний, подтверждающий легитимность применения отечественных разработок на территории ЕС СИКН приведен в Приложении Ж.

4. Полученные метрологические характеристики, таблица 5.3 позволяют получить поверочный комплекс с улучшенными метрологическими характеристиками, работающий на углеводородных жидкостях. Сертификация на подтверждение калибровочных и измерительных возможностей проводится НМИ «VSL» (Нидерланды) в 2015 г. Международные сличения ЗАО «Нефтегазметрология» с зарубежными поверочными комплексами планируется провести в 2015г. В таблице 5.3 представлены калибровочные возможности поверочных комплексов, работающих на углеводородных жидкостях.

**Таблица 5.3** Калибровочные и измерительные возможности (СМС) поверочных комплексов, работающих на углеводородных жидкостях

Страна, метрологическая служба предприятия	Диапазон объемного расхода, м <sup>3</sup> /час	Неопределенность измерений калиброванного объема поверочной установки, % (тип ПУ) / доверительная вероятность / коэффициент охвата
США, фирма Cameron, г. Питтсбург	40...3600	± 0,03 (КП) / 0,95 / 2 ± 0,04 (ТПУ) / 0,95 / 2 ± 0,07 (ТПУ) / 0,95 / 2
Великобритания, NEL, г. Глазго	0,1...600	± 0,03...0,08 (весы, ПУ, мастер-счетчик) / 0,95 / 2
Франция, Traqil, г. Париж	10...2500	± 0,04 (ТПУ) / 0,95 / 2
РФ, ЗАО «Нефтегазметрология» г. Белгород	0,5...2200	± 0,03 (КП, ТПУ) / 0,99 / 3 ± 0,02 (КП, ТПУ) / 0,95 / 2

7. Калибровочные и измерительные возможности позволят предоставлять Росстандарту калибровочные возможности поверочного комплекса для проведения сертификационных испытаний на рабочих жидкостях, при возникновении споров между поставщиком и потребителем при приемо-сдаточных операциях углеводородных жидкостей [56].

#### 5.4 Выводы по главе 5

1. Положительные результаты экспериментальных исследований позволили получить эталоны [46] с улучшенными метрологическими характеристиками:

- весы с погрешностью ± 0,005 %;
- мерники с погрешностью ± 0,01 %;

- мобильные ПУ с погрешностью  $\pm 0,03$  % для поверки стационарных ПУ на месте эксплуатации с погрешностью  $\pm 0,05$  %;

- стационарные эталонные ПУ с погрешностью  $\pm 0,03$  % для поверки преобразователей расхода на месте эксплуатации с погрешностью  $\pm 0,05$  %,  $\pm 0,10$  %,  $\pm 0,15$  %;

- исходный эталон единицы массы и объема углеводородных жидкостей для МО эталонных и рабочих СИ.

2. Весы специальные ВСПМ на базе трехкомпонентных весоизмерительных датчиков рекомендуется применить в составе установок высшей точности (УВТ) по ГОСТ 8.510-2002 [19] и ГОСТ 8.142-2013 [33], в других автоматизированных установках расхода жидкости с переключателями потока жидкости, использующих весы до 25 тонн.

3. Весы ВСПМ на базе трехкомпонентных весоизмерительных датчиков рекомендуется применить для поверки эталонных мерников с улучшенными метрологическими характеристиками и эталонных мерников 1-го, 2-го разрядов в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.682-2009 [27].

4. Результаты исследований весов ВСПМ [46, 71] на базе трехкомпонентных весоизмерительных датчиков дали возможность создать эталонные средства измерений и поверочный комплекс для целей метрологического обеспечения достоверных измерений массы, объема нефти, нефтепродуктов, решить задачи импортозамещения средств измерений для применения в сфере ТЭК РФ.

5. Практическая реализация результатов диссертационной работы подтверждается метрологической экспертизой технического проекта Белгородского поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология», выполненными ФГУП «ВНИИМ» им. Д.И. Менделеева [76], ФГУП «ВНИИР» [77], результатами поверок средств измерений массы и объема, счетчиков жидкости, оформленных ГНМЦ.

## Заключение

1. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что технические и методические решения позволили улучшить в 2 раза метрологические характеристики эталонных мерников и в 1,7 раза улучшить метрологические характеристики поверочных установок, в 4 раза снизить временные затраты на их поверку. В 7 раз снизить затраты на закупку эталонного оборудования, в 2 раза уменьшить затраты на техническое обслуживание и эксплуатацию.

2. Результаты исследований и расчеты, разработанные методики поверки на основе специальных трехкомпонентных весов ВСПМ [46, 71] позволили внедрить в метрологическую практику:

- эталонные мерники 1-го разряда [46, 72] доверительной суммарной относительной погрешностью  $\pm 0,01$  %;

- мобильные эталонные поверочные установки 1-го разряда [46, 74] с доверительной суммарной относительной погрешностью измерений объема  $\pm 0,03$  %, предназначенные для поверки на месте эксплуатации стационарных поверочных установок с доверительной суммарной погрешностью  $\pm 0,05$  %;

- стационарные эталонные поверочные установки 1-го разряда [46, 74] с доверительной суммарной погрешностью измерений объема  $\pm 0,03$  %, предназначенные для поверки на месте эксплуатации преобразователей расхода с доверительной суммарной погрешностью  $\pm 0,07$  %,  $\pm 0,10$  %,  $\pm 0,15$  %.

3. Разработан поверочный комплекс на основе исходного эталона и стандарт СТО НГМ 1.1-2014 поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» [46] с доверительной суммарной погрешностью измерений объема  $\pm 0,03$  % при доверительной вероятности 0,99 в диапазоне расхода углеводородных жидкостей от 0,5 до 2200 м<sup>3</sup>/час. Рабочие эталоны единицы объема 1-го разряда поверочного комплекса внесены приказом ФАТРМ в реестр эталонов 3.6.ABP.0001.2015, 3.6.ABP.0002.2015 [46].

4. Исходный эталон поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология» [46] предназначен для хранения и передачи единиц массы и объема жидкости измерительным преобразователям объемного и массового расхода, счетчикам жидкости, компакт-пруверам, трубопоршневым поверочным установкам (ТПУ) 1-го и 2-го разрядов по ГОСТ 8.510-2002 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объема и массы жидкости» [19] и ГОСТ 8.142-2013 «ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений массового и объемного расхода (массы и объема) жидкости» [33] [<http://www.imsholding.ru/kalibrovochnyjicentrneftegazmetrologija/>].

5. Методики поверки на базе весов ВСПМ [46, 71] рекомендуется применять для метрологического обеспечения измерений расхода жидкостей с переключателями потока на базе весов с НПВ до 25 тонн по ГОСТ 8.142-2013 [33], для поверки эталонных мерников 1-го и 2-го разрядов в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.682-2009 «ГСИ. Мерники металлические эталонные. Методика поверки» [27].

6. Результаты исследований и разработанные методики измерений на базе специальных весов ВСПМ позволили усовершенствовать метрологическое обеспечение учета нефти и нефтепродуктов при коммерческих операциях в соответствии РМГ 100-2010 «ГСИ. Рекомендации по определению массы нефти при учетных операциях с применением систем измерений количества и показателей качества нефти» [9] и РМГ 106-2010 «ГСИ. Рекомендации по определению массы нефти при учетных операциях с применением систем измерений количества и показателей качества нефти» [10], кроме этого позволяют решить задачу импортозамещения средств измерений в сфере ТЭК.

## **Список основных сокращений и условных обозначений**

РФ – Российская Федерация;  
ЕС – Европейское сообщество;  
ФЗ – федеральный закон;  
ФАТРМ – федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии  
ГНМЦ – государственный метрологический центр  
ГПЭ – государственный первичный эталон;  
ТЭК - топливно-энергетического комплекс;  
НМИ – национальный метрологический институт;  
VSL – институт метрологии Нидерландов;  
СИ – средство измерений;  
ПК – поверочный комплекс;  
СКО - среднее квадратическое отклонение;  
СИКН – система измерений количества и показателей качества нефти;  
СИКНП - система измерений количества и показателей качества нефтепродуктов;  
ОГВ – образцовые грузопоршневые весы;  
УПП - устройства переключения потоков;  
ИВК – измерительно-вычислительный комплекс;  
СЖ - счетчик жидкости камерный положительного вытеснения;  
ПР – преобразователь расхода;  
ТПР – турбинный преобразователь расхода;  
УЗПР – ультразвуковой преобразователь расхода;  
ПУ – поверочная установка;  
ЭПУ – эталонная поверочная установка;  
ТПУ – трубопоршневая поверочная установка;  
КП – компакт-прувер;  
БИЛ – блок измерительных линий;  
ИЛ – измерительная линия;  
ПП – преобразователь плотности;  
УИК - узел измерений параметров качества рабочей среды;  
МХ – метрологические характеристики;  
КМХ – контроль метрологических характеристик;  
НПВ – наибольший предел взвешивания;  
НмПВ – наименьший предел взвешивания;  
УВТ – установка высшей точности;

СМС (calibration and measurement capability) – калибровочные и измерительные возможности;

$A$  – матрица;

$u_A$  – стандартная неопределенность, оцениваемая по типу А;

$u_B$  – стандартная неопределенность, оцениваемая по типу В;

$u_c$  – суммарная стандартная неопределенность;

$U$  – расширенная неопределенность;

$k$  – коэффициент охвата;

$S$  – СКО показаний весов;

$N$  – Число измерений при определении коэффициентов преобразования датчиков;

$m$  – вектор масс измеряемых нагрузок;

$k$  – вектор коэффициентов преобразования датчиков.



### Список использованных источников

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. N 102-ФЗ Об обеспечении единства измерений. М.: Издательство стандартов, 2008, - 33 с.
2. ГСССД 2-89 Государственная служба стандартных справочных данных. Свойства материалов и веществ. Вода и водяной пар. Вып. 1. Таблицы стандартных справочных данных ВНИЦМВ. М.: Издательство стандартов, 1990, - 158 с.
3. РМГ 29-99 Государственная система обеспечения единства измерений. Основные термины и определения». М.: Издательство стандартов, 2001, - 149 с.
4. РМГ 43-2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Применение руководства по выражению неопределенности измерений. М.: Издательство стандартов, 2001, - 24 с.
5. РМГ 63-2003 Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации. М.: Издательство стандартов, 2004, - 28 с.
6. РМГ 91-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». М.: Издательство стандартов, 2009, - 16 с.
7. РМГ 89-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Приемосдаточные пункты нефти. Метрологическое и техническое обеспечение. Государственная система обеспечения единства измерений М.: Издательство стандартов, 2011, - 15 с.
8. РМГ 98-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок метрологического и технического обеспечения ввода в промышленную эксплуатацию систем измерений количества и показателей качества нефти. М.: Издательство стандартов, 2011, - 15 с.
9. РМГ 100-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Рекомендации по определению массы нефти при учетных операциях с применением систем измерений количества и показателей качества нефти. М.: Стандартиформ, 2012, - 54 с.
10. РМГ 106-2010 Государственная система обеспечения единства измерений Нормы погрешности баланса сдаваемой и принимаемой нефти по ОАО МН «АК «Транснефть»». М.: Стандартиформ, 2013, - 8 с.
11. Р РСК 002-06 Основные требования к методикам калибровки, применяемым в Российской системе калибровки. Москва: ФГУП «ВНИИМС», 2006, - 11 с.
12. ГОСТ 8.400-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Мерники металлические эталонные. Методика поверки. М.: Стандартиформ, 2014, - 20 с.

13. ГОСТ 8.400-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Мерники металлические образцовые. Методы и средства поверки. М.: Издательство стандартов, 1980, - 22 с.
14. ГОСТ 7328-2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Гири. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 2001, - 21 с.
15. ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. М.: Издательство стандартов, 2002, - 24 с.
16. ГОСТ Р 51858-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Нефть товарная. М.: Издательство стандартов, 2002, - 20 с.
17. ГОСТ Р 8.596-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. М.: Издательство стандартов, 2002, - 19 с.
18. ГОСТ 8.024-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений плотности. М.: Издательство стандартов, 2002, - 7 с.
19. ГОСТ 8.510-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений объема и массы жидкости. М.: Стандартинформ, 2001, - 12 с.
20. ГОСТ 24104 - 2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Весы лабораторные. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2001, - 8 с.
21. ГОСТ Р 8.595-2004 Государственная система обеспечения единства измерений. Масса нефти и нефтепродуктов. Общие требования к методикам выполнения измерений. М.: Стандартинформ, 2004, - 21 с.
22. ГОСТ Р 54500.3-2011 / Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. М.: Стандартинформ, 2012. – 107 с.
23. ГОСТ Р 54500.3-2011 / Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. М.: Стандартинформ, 2012. – 83 с.
24. ГОСТ 8.021-2005 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений массы. М.: Стандартинформ, 2007, - 12 с.
25. ГОСТ 8.061-2007 Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение. М.: Стандартинформ, 2007, - 28 с.

26. ГОСТ Р 8.663-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений силы. М.: Стандартинформ, 2010, - 13 с.
27. ГОСТ Р 8.682-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Мерники металлические эталонные. Методика поверки. М.: Стандартинформ, 2011, - 20 с.
28. ГОСТ OIML R 76-1-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания. М.: Стандартинформ, 2013, - 142 с.
29. ГОСТ Р 54071-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Весы неавтоматического действия. Часть 2. Формы протоколов испытаний. М.: Стандартинформ, 2011, - 71 с.
30. ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. М.: Стандартинформ, 2012. - 107 с.
31. Р 50.2.078-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок подготовки к утверждению государственных первичных эталонов единиц величин: рекомендации по метрологии. - М.: Стандартинформ, 2012. - 23 с.
32. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. - М.: Стандартинформ, 2013. - 24 с.
33. ГОСТ 8.142-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений массового и объемного расхода (массы и объема) жидкости. М.: Стандартинформ, 2013. - 14 с.
34. ГОСТ OIML R 111-1-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Гири классов E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, M<sub>1</sub>, M<sub>1-2</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>2-3</sub> и M<sub>3</sub>. Часть 1. Метрологические и технические требования. - М.: Стандартинформ, 2012. - 102 с.
35. Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. под науч. ред. проф. Слаева В.А. - СПб.: ГП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 1999. - 126 с.
36. Фридман, А.Э. Основы метрологии. Современный курс / А.Э. Фридман. - СПб.: Профessional, 2008. - 280 с.
37. Мироновский, Л.А. Алгоритмы оценивания результата трех измерений / Мироновский, Л.А., Слаев В.А. - СПб.: Профessional, 2008. - 280 с.
38. Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины / Пер. с англ. под науч. ред. В.С. Александрова, Н.А. Жагора. - СПб.: Профessional, 2010. - 80 с.

39. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. Приложение 1 к «Руководству по выражению неопределенности измерения» Оценивание данных измерений / Пер. с англ. под науч. ред. В.А. Слаева, А.Г. Чуновкиной. — СПб.: Профессионал, 2010. — 162 с.

40. Введение к «Руководству по выражению неопределенности измерения» и сопутствующим документам. Оценивание данных измерений / Пер. с англ. под науч. ред. д.т.н., проф. В.А. Слаева, д.т.н. А.Г. Чуновкиной. — СПб.: Профессионал, 2011. — 43 с.

41. ГОСТ OIML R 111-2-2014 Государственная система обеспечения единства измерений. Гири классов E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, M<sub>1</sub>, M<sub>1-2</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>2-3</sub> и M<sub>3</sub>. Часть 2. Формы протоколов испытаний. М.: Стандартинформ, 2014, - 48 с.

42. Сафонов, А. В. Работы ТК310 по стандартизации в области измерений массы / В. С. Снегов, А. В. Сафонов // Приборы. - 2009. - №3. - С. 27-28.

43. Сафонов, А. В. Сжиженный природный газ, метрологическое обеспечение измерений / Н. В. Даниленко, Г. Э. Ратвелл, А. В. Сафонов, М. А. Сафонова // Сфера Нефть и газ. - 2013. - №3. С. 38-41.

44. Сафонов, А. В. Опыт применения ультразвуковых преобразователей расхода в составе систем измерений количества и показателей качества нефти / Сафонов А. В. // Измерительная техника. - 2014. - №4. - С. 59-61.

45. Сафонов, А. В. Пути повышения точности измерений массы и объема нефти и нефтепродуктов / Сафонов А. В., Снегов В. С., Остривной А. Ф., Каменских Ю. И.// Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. - 2014. - №11. С. 3-9.

46. СТО НГМ 1.1-2014 Стандарт организации. Локальная поверочная схема для средств измерений объема и массы нефти и нефтепродуктов, мерников эталонных металлических с применением эталона единиц объема и массы нефти и нефтепродуктов Поверочного комплекса ЗАО «Нефтегазметрология». Белгород.: ЗАО «Нефтегазметрология», 2014. -24 с.

47. МИ 1747-87 Государственная система обеспечения единства измерений Меры массы образцовые и общего назначения. Методика поверки. Санкт-Петербург, НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 1987. – 22 с.

48. МИ 1971-95 Государственная система обеспечения единства измерений Установки поверочные на базе весов ОГВ. Методика поверки. Казань, ГНМЦ «ВНИИР», 1995. - 22 с.

49. МИ 1972-95 Государственная система обеспечения единства измерений Рекомендация. ГСИ. Установки поверочные трубопоршневые. Методика поверки поверочными установками на базе весов ОГВ или мерников. Казань, ГНМЦ «ВНИИР», 1995. - 63 с.

50. МИ 2000 Государственная система обеспечения единства измерений Установка поверочная трубопоршневая малого объема SVP–2 фирмы "Smith Meter Inc" An FMC Corporation

subsidiary, США, Германия, Методика поверки поверочной установкой на базе эталонных мерников 1-го разряда. Казань, ГНМЦ «ВНИИР», 2000. – 16 с.

51. МИ 2622-2000 Государственная система обеспечения единства измерений Установки поверочные трубопоршневые 2-го разряда. Методика поверки поверочной установкой типа "Brooks compact Prover" фирмы "Brooks instrument" (США). ГНМЦ «ВНИИР», 2000. – 26 с.

52. МИ 2267-2000 Государственная система обеспечения единства измерений Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации. Москва, ГНМЦ «ВНИИМС», 2000. – 14 с.

53. МИ 2002 Государственная система обеспечения единства измерений Мерники металлические эталонные наливные 1-го разряда. Методика поверки. Санкт-Петербург, ГНМЦ «ВНИИМ», 2002. – 5 с.

54. МИ 2002 Государственная система обеспечения единства измерений Весы платформенные. Изготовленные фирмой Mettler Toledo, Швейцария. Методика поверки. Санкт-Петербург, ГНМЦ «ВНИИР», 2002. – 10 с.

55. МИ 2004 Государственная система обеспечения единства измерений Мерники эталонные 1-го разряда типа «М» фирмы «Seraphin test measure company» США. Методика поверки. Казань, 2004. – 8 с.

56. Государственная система обеспечения единства измерений Рекомендации по определению массы нефти при учетных операциях с применением систем измерения количества и показателей качества нефти. Казань, ФГУП «ВНИИР», 2005. – 65 с.

57. МП 2301-0022-2006 Государственная система обеспечения единства измерений Мерники металлические эталонные 1-го разряда. Методика поверки. Санкт-Петербург, ФГУП «ВНИИМ», 2006. – 5 с.

58. МП 2301-0023-2006 Государственная система обеспечения единства измерений Весы высокого класса точности KES 1500 фирмы «Меттлер Толедо». Методика поверки. Санкт-Петербург, ФГУП «ВНИИМ», 2006. – 10 с.

59. МИ 2974-2006 Государственная система обеспечения единства измерений Установки поверочные трубопоршневые 2-го разряда. Методика поверки трубопоршневой поверочной установки 1-го разряда с компаратором. Казань, ФГУП «ВНИИР», 2006. – 52 с.

60. МИ 3058-2007 Государственная система обеспечения единства измерений Мерники металлические эталонные 1-го разряда. Методика поверки. Санкт-Петербург, ФГУП «ВНИИР», 2007. – 7 с.

61. МИ 3059-2007 Государственная система обеспечения единства измерений Весы платформенные высокого класса точности KES 1500 фирмы Меттлер Толедо. Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИМ», 2007. – 11 с.
62. МП РТ 1212-2007 Государственная система обеспечения единства измерений Гири классов точности E1, E2, F1, F2, M1. Методика поверки. Москва, ФГУ «РОСТЕСТ-МОСКВА», 2007. – 20 с.
63. МИ 3155-2008 Государственная система обеспечения единства измерений Установки поверочные трубопоршневые. Методика поверки поверочными установками на базе мерника и объемного счетчика. Казань, ФГУП «ВНИИР», 2008. – 19 с.
64. МП 2301-203-2009 Государственная система обеспечения единства измерений Компараторы весовые ВК. Методика поверки. Санкт-Петербург, ГНМЦ «ВНИИМ», 2002. – 5 с.
65. МИ 3225-2009 Государственная система обеспечения единства измерений Установки поверочные CP, CP-M фирмы Emerson Process Management/Daniel Measurement and Control Inc США. Методика поверки. Казань, ФГУП «ВНИИР», 2009. – 20 с.
66. МИ 3209-2009 Государственная система обеспечения единства измерений Установки поверочные трубопоршневые. Методика поверки с помощью поверочной установки на базе эталонных мерников. Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИМ», 2009. – 23 с.
67. МИ 3268-2010 Государственная система обеспечения единства измерений Установки поверочные трубопоршневые 2-го разряда. Методика поверки установками поверочными на базе компакт-прувера и компаратора. Казань: ФГУП «ВНИИР», 2010. – 21 с.
68. МИ 3264-2010 Государственная система обеспечения единства измерений Установки трубопоршневые Calibron серий S и O фирмы Honeywell Enraf Americans, Inc США. Методика поверки. Казань: ФГУП «ВНИИР», 2011. – 11 с.
69. МИ 2550-0163-2011 Государственная система обеспечения единства измерений Установки поверочные FMD. Методика поверки. Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИМ», 2011. – 21 с.
70. МП 49021-12 Государственная система обеспечения единства измерений Установки трубопоршневые Syncrotrak фирмы Calibron Systems Inc., США. Методика поверки с помощью эталонных мерников. Казань: ФГУП «ВНИИР», 2011. – 15 с.
71. МП 2301-4-0149-2015 Весы специальные для взвешивания жидкостей ВСПМ. Методика поверки. Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИМ», 2015. – с. 16.
72. МП 2301-0150-2015 Эталонные мерники 1-го разряда. Методика поверки. Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИМ», 2015. – с. 18.

73. МП 2302-083-2015 Преобразователи плотности жидкости поточные. Методика поверки. Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИМ», 2015. – с. 21.
74. МП 2550-0261-2015 Установки поверочные трубопоршневые. Методика поверки. Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИМ», 2015. – с. 24.
75. МП 2550-0262-2015 Установка поверочная «ВСП-М». Методика поверки. Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИМ», 2015. – с. 21.
76. Экспертное заключение на технический проект 0652.00.00.000 «Техническое перевооружение калибровочной станции на продуктах». Санкт-Петербург: ФГУП «ВНИИМ», 2014. – 5 с.
77. Экспертное заключение на технический проект 0652.00.00.000 «Техническое перевооружение калибровочной станции на продуктах». Казань: ФГУП «ВНИИР», 2014. – 7 с.
78. **G01F** Патент на полезную модель №:102995. Установка для поверки трубопоршневых установок / А.В. Сафонов (RU), Бобрик Н. В. (BY) // - 2009.
79. CMC Certificate number 39332546 A test installation for the calibration of Pipe Provers // VSL Dutch Metrology Institute // - 2014. – p. 2. – Режим доступа: <http://www.vsl.nl/en/vsl-cmc-certified>.
80. Traceability manual OGSB calibration facility for Pipe Provers // VSL Dutch Metrology Institute // - 2014. – p. 52.
81. Новые средства измерений в нефтегазовой промышленности / А.В. Сафонов // Конференция «Метрология нефтегазовой отрасли»: сб. тез. докл. Санкт-Петербург, 2009.
82. Опыт применения новых преобразователей расхода / А.В. Сафонов, С.Ю. Денисенко // Метрологическая конференция: сб. тез. докл. - Казань, 2010.
83. От единицы массы к единице плотности, прослеживаемость результатов измерений / А.В. Сафонов, Д. Фитцджеральд // Конференция «Нефтегаз 2011»: сб. тез. докл. - Москва, 2011.
84. Новые средства измерений количества и качества нефти, нефтепродуктов, опыт применения / А.В. Сафонов, С.Ю. Денисенко // Конференция «Актуальные вопросы метрологического обеспечения учета жидкостей и газов»: сб. тез. докл. - Казань, 2011.
85. OIML R 60 – 2000 International Recommendation. Metrological regulation for load cells. International Organization of Legal Metrology. – Paris, 2000. – 86 p.
86. Опыт применения ультразвуковых преобразователей расхода в составе измерений количества и показателей качества нефти / А.В. Сафонов, С.Ю. Денисенко, И.Р. Каррамов // Третья Всероссийская конференция «Метрология и стандартизация нефтегазовой отрасли - 2013»: сб. тез. докл. - Санкт-Петербург, 2013.

87. Калибровочная станция для целей метрологического обеспечения преобразователей расхода жидких углеводородов / М.С. Гуревич, А.В. Сафонов, С.Ю. Денисенко, И.Р. Каррамов // Международная метрологическая конференция «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов»: сб. тез. докл. - Казань, 2013.

88. Калибровочная станция ЗАО «Нефтегазметрология» / А.В. Сафонов // 2-я Международная метрологическая конференция «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов»: сб. тез. докл. - Казань, 2014.

89. The Measurement of Mass and Weight / Stuart Davidson, Michael Perkin – Division of Engineering and Process Control National Physical Laboratory - UK; Mike Buckley – South Yorkshire Trading Standards Unit – UK // Measurement Good Practice Guide. – 2004. - No. 71. – 28 p.



## Приложение А

### Расчет коэффициентов весов ВСПМ-1500

1. Определение коэффициентов преобразования датчиков весов  
 Юстировку весов проводят с помощью эталонных гирь 3-го разряда массой 500 и 1500 кг.  
 Результаты юстировки с помощью комплекта гирь общей массой 500 кг.  
 Действительное значений массы гири  $m_R = 500,0014$  кг. Суммарная стандартная  
 неопределенность гири  $u_c(m_R) = 0,0012$  кг.

Определение коэффициентов датчиков весов:

	<b>ORIGIN:= 1</b> Нумерация строк и столбцов с "1" <small>XXXXXXXXXX</small> e - единичный вектор	$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$																																							
	<b>N := 13</b> Число измерений:    i := 1,2..N																																								
	Матрица входных сигналов (13 x 3)    Нагрузка    M1 := 500.001 кг																																								
	C1    C2    C3 Стандартная неопределенность Преобразование в векторы: $ur1 := 1.2 \cdot 10^{-3}$ кг эталонной гири $m1 := M1 \cdot e$ $umr1 := ur1 \cdot e$	$e :=$																																							
	Число калибруемых датчиков p=3:    p := 1,2..3																																								
	Число степеней свободы:    f := N - 3																																								
	Обозначение: $L1 := (A1^T \cdot A1)^{-1} \cdot A1^T$																																								
	Вектор коэффициентов преобразования k (3 x 1) $k1 := L1 \cdot m1$																																								
	$k1 = \begin{pmatrix} 0.002955 \\ 0.002939 \\ 0.002939 \end{pmatrix}$																																								
A1 :=	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>60542</td><td>53000</td><td>56265</td></tr> <tr><td>61918</td><td>52404</td><td>55490</td></tr> <tr><td>60311</td><td>54550</td><td>54952</td></tr> <tr><td>57142</td><td>54260</td><td>58436</td></tr> <tr><td>53079</td><td>55550</td><td>61229</td></tr> <tr><td>55797</td><td>50314</td><td>63729</td></tr> <tr><td>59738</td><td>54597</td><td>55472</td></tr> <tr><td>67396</td><td>51498</td><td>50879</td></tr> <tr><td>63310</td><td>60007</td><td>46484</td></tr> <tr><td>60416</td><td>55456</td><td>53947</td></tr> <tr><td>52093</td><td>58983</td><td>58777</td></tr> <tr><td>53422</td><td>51361</td><td>65067</td></tr> <tr><td>56597</td><td>58064</td><td>55173</td></tr> </table>	60542	53000	56265	61918	52404	55490	60311	54550	54952	57142	54260	58436	53079	55550	61229	55797	50314	63729	59738	54597	55472	67396	51498	50879	63310	60007	46484	60416	55456	53947	52093	58983	58777	53422	51361	65067	56597	58064	55173	
60542	53000	56265																																							
61918	52404	55490																																							
60311	54550	54952																																							
57142	54260	58436																																							
53079	55550	61229																																							
55797	50314	63729																																							
59738	54597	55472																																							
67396	51498	50879																																							
63310	60007	46484																																							
60416	55456	53947																																							
52093	58983	58777																																							
53422	51361	65067																																							
56597	58064	55173																																							

СКО     $s1 := \sqrt{SC1}$

## Продолжение приложения А

### Расчет неопределенности

$$OY1 := A1 \cdot k1 \quad \text{кг/ед}$$

Оценки остаточных погрешностей:

$$\Delta 1 := m1 - OY1$$

Оценки результатов взвешивания:

Групповая  $SC1 = 0.0002881 \text{ кг}^2$

дисперсия  $S1 = 0.017 \text{ кг}$

Ковариационная матрица:  $VA1 := (A1^T \cdot A1)^{-1}$

Неопределенность вектора коэффициента преобразования k по типу А:

$$ukA1_{p,p} := S1 \cdot \sqrt{VA1_{p,p}}$$

$$ukA1_{p,p} = \begin{pmatrix} 8.42 \times 10^{-7} \\ 1.13 \times 10^{-6} \\ 6.97 \times 10^{-7} \end{pmatrix} \text{ кг/ед}$$

$$\Delta 1 =$$

$$\begin{pmatrix} 0.017 \\ -0.019 \\ 0.004 \\ -0.02 \\ -0.014 \\ -0.004 \\ 0.03 \text{ кг} \\ 0.008 \\ -0.009 \\ -0.016 \\ 0.017 \\ 0.004 \\ 0.001 \end{pmatrix}$$

Неопределенность вектора коэффициента преобразования k по типу В:

$$ukB1 = L1 \cdot umr1$$

$$ukB1 = \begin{pmatrix} 7.23 \cdot 10^{-9} \\ 7.19 \cdot 10^{-9} \\ 7.20 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix}$$

Расширенная неопределенность вектора k:

$$Uk1_p = 2 \cdot \sqrt{(ukA1_{p,p})^2 + (ukB1_{p,p})^2}$$

$$Uk1 = \begin{pmatrix} 1.24 \cdot 10^{-6} \\ 1.72 \cdot 10^{-6} \\ 1.24 \cdot 10^{-6} \end{pmatrix}$$

Расширенная неопределенность измерений массы:

$$U(m) = 2 \cdot \sqrt{S01^2 + u_w^2} \quad U(m) = 0.016 \text{ кг} .$$

**Продолжение приложения А**  
**Расчет погрешности взвешивания**

2. Определение погрешности взвешивания при дополнительной нагрузке  $M1+\Delta M$  :  
 $m01 := (m1 + \Delta m)$

Число измерений:  $n := 6$

$\Delta m := 10.00$  кг

$m1 = 500.0014$  кг

Суммарная стандартная неопределенность эталонных гирь:  $u_{1w} = 0.00125$  кг

$$V1 := \begin{pmatrix} 58274 & 55392 & 59568 \\ 54211 & 56682 & 62361 \\ 56929 & 51446 & 64861 \\ 60870 & 55729 & 56604 \\ 68528 & 52630 & 52011 \\ 64442 & 61139 & 47616 \end{pmatrix}$$

Погрешность взвешивания:  $\Delta 01 := V1 \cdot k1 - m01$

$$\Delta 01 = \begin{pmatrix} 0.017 \\ 0.011 \\ 0.001 \\ -0.033 \\ -0.011 \\ 0.006 \end{pmatrix} \text{ кг}$$

Результат взвешивания (среднее значение):

$$m01 := 510.0024 + \frac{\left( \sum_{j=1}^n \Delta 1_j \right)}{n} \quad m01 = 509.9964$$

Неисключенная систематическая

$$\Delta m1 = m01 - 510.0024$$

погрешность:

$$\Delta m1 = -0.006 \text{ кг}$$

Расширенная неопределенность измерений:

$$U := 2 \cdot \sqrt{S01^2 + \Delta m1^2 + u_{w1}^2} \quad U = 0.017 \text{ кг}$$

## Приложение Б

### Калибровочные и измерительные возможности ООО «СНГБ»



## CMC Certificate

Certificate number : 39332546  
Project number : 14302587  
Page 1 of 2

**Applicant** Oil & Gas Systems Baltia, LTD  
41, Portovaya street  
Kaliningrad 236039  
Russian Federation

**Submitted** A test installation for the calibration of Pipe Provers.

Installation identification : OGSB Pipe Prover calibration facility  
Test liquid : water  
Calibration range : from 0.2 to 40 m<sup>3</sup>

The test installation mainly consists of:

- two storage tanks,
- a pump with a maximum flow of 1000 L/min,
- a section for the Pipe Prover under test,
- a test measure with a nominal capacity of 1000 liter,
- a liquid flow meter with a maximum flow of 1200 L/min,
- a set of temperature and pressure instruments,
- several connection pipes, valves and hoses,
- a dedicated control unit/computer.

The test installation is in use for the calibration of Pipe Provers utilizing the master meter method.

**CMC Calculation** The CMC uncertainty calculation method is described on page 2 of this certificate.

**Period of Investigation** August 4<sup>th</sup> through December 12<sup>th</sup> 2014.

**Results** The results of the CMC uncertainty calculation are shown on page 2 of this certificate.

Dordrecht, December 15<sup>th</sup> 2014  
VSL B.V.

F.M. Smits  
Senior Metrologist Liquid Flow & Volume Metrology



VSL B.V.  
Thijsseweg 11, 2629 JA Delft (NL)  
P.O. Box 654, 2600 AR Delft (NL)  
T +31 15 269 15 00  
F +31 15 269  
I www.vsl.nl

This certificate is issued under the provision that no liability is accepted and that the applicant gives warranty for each responsibility against third parties.

Reproduction of the complete certificate is permitted. Parts of this certificate may only be reproduced after written permission.

**CMC Calculations** The Calibration and Measurement Capabilities (CMC's) were determined in accordance with the JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. The method is reported in the addendum to this certificate, called "Traceability manual OGSB calibration facility for Pipe Provers", version 1; December 15<sup>th</sup> 2014 by VSL.

**Results** The Calibration Measurement Capability for the test installation is:

Range [m <sup>3</sup> ]	CMC [%]
0.2 to 40	0.05

The reported Calibration Measurement Capabilities are based on the standard uncertainty of measurement multiplied by a coverage factor  $k = 2$ , which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with the JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement.

**Usages of CMC** The Calibration Measurement Capabilities are only valid if the criteria stated in the the addendum "Traceability manual OGSB calibration facility for Pipe Provers" under "conclusion CMC" are fulfilled.

**Traceability** All instrument used in the test installation were verified to be traceable to primary and/or (inter)nationally accepted measurement standards.

**Remarks**

- The Calibration and Measurement Capability are defined according document CIPM MRA-D-04 version 4 (October 2013) "Calibration and Measurement Capabilities in the context of the CIPM MRA" and ILAC-P14:01/2013 "ILAC Policy for Uncertainty in Calibration" as "A CMC is a Calibration and Measurement Capability available to customers under normal conditions". To identify all the sources contributing to the CMC uncertainty the guideline "WGFF Guidelines for CMC Uncertainty and Calibration Report Uncertainty" from the Working Group for Fluid Flow of BIPM CCM is used.
- Uncertainty contribution from repeated observations during the test runs of Pipe Provers (type A contributions) are included in the CMC.
- Instruments can be replaced as long as they meet the same uncertainty as the instruments used for the uncertainty calculations in the addendum.

## Приложение В

### Экспериментальные исследования весов ВСПМ-1500

Место калибровки: г. Калининград, ООО «OGSB»

Модель: компаратор ВСПМ-1500. № 001.

Эталонные средства: весы-компаратор ВСЛ-30 К/0,1 с СКО 100 мг, зав. № 184203, свид-во ВНИИМ № 2301-592/2014 от 13.03.2014, эталонная гиря 2-го разряда 20 кг по ГОСТ 8.021, зав. № 23625282, свидетельство ВНИИМ № 2301-1892-2013. от 30.11.2013, комплект балластных грузов общей массой 320 и 1320 кг. Весы градуируют по 2-м значениям массы, приблизительно равными массе пустого и массе заполненного мерника. Показания датчиков по индикаторам И1, И2, И3 при нулевой внешней нагрузке на платформе, при нагрузке 320,0061 кг и 1320,064 кг, таблица 1. Т – масса платформы.

**Таблица 1** Показания датчиков по индикаторам И1, И2, И3

№ п/п	Нагрузка, кг								
	Т			320+Т			1320+Т		
	И1	И2	И3	И1	И2	И3	И1	И2	И3
1	20951	21122	21162	60542	53000	56265	152655	172085	178008
2	20957	21120	21164	61918	52404	55490	161342	169508	171857
3	20957	21119	21162	60311	54550	54952	152655	172085	178008
4	20959	21126	21163	57142	54260	58436	153020	173997	175733
5	20961	21129	21158	53079	55550	61229	141741	183390	177636
6	20955	21124	21157	55797	50314	63729	152655	172085	178008
7	20952	21120	21158	59738	54597	55472	158690	177232	166769
8	20948	21120	21157	67396	51498	50879	175063	171180	156402
9	20950	21118	21158	63310	60007	46484	156691	191425	154553
10	20951	21119	21159	60416	55456	53947	152655	172085	178008
11	20949	21122	21160	52093	58983	58777	171478	168090	163130
12	20954	21121	21160	53422	51361	65067	175291	152575	174869
13	20951	21120	21158	56597	58064	55173	178522	163733	160417

Показания датчиков, приведенные к массе нетто приведены в таблице 2.

**Таблица 2** Показания массы нетто

№ п/п	Нагрузка, кг					
	320			1320		
	И1	И2	И3	И1	И2	И3
1	39591	31878	35103	131707	150949	156853
2	40961	31284	34326	140394	148372	150702
3	39354	33431	33790	131707	150949	156853
4	36183	33134	37273	132072	152861	154578
5	32118	34421	40071	120793	162254	156481
6	34842	29190	42572	131707	150949	156853
7	38786	33477	34314	137742	156096	145614
8	46448	30378	29722	154115	150044	135247
9	42360	38889	25326	135743	170289	133398
10	39465	34337	32788	131707	150949	156853
11	31144	37861	37617	150530	146954	141975
12	32468	30240	43907	154343	131439	153714
13	35646	36944	34015	157574	142597	139262

Показания весов и значения остаточных погрешностей приведены в таблице 3.

**Таблица 3** Показания весов и остаточных погрешностей

№ п/п	Нагрузка, кг			
	320		1320	
	Показание, кг	Погрешность, кг	Показание, кг	Погрешность, кг
1	319.992	-0.014	1320.017	-0.009
2	320	-0.006	1319.979	-0.047
3	320.006	-0.001	1320.017	-0.009
4	320.028	0.022	1320.05	0.023
5	320.02	0.014	1320.058	0.032
6	320.014	0.008	1320.017	-0.009
7	319.978	-0.028	1319.984	-0.043
8	320.005	-0.001	1319.992	-0.034
9	320.016	0.010	1320.051	0.024
10	320.025	0.019	1320.017	-0.009
11	319.987	-0.019	1320.069	0.043
12	320.004	-0.002	1320.056	0.029
13	320.005	-0.001	1320.035	0.008
Среднее	320.006	0	1320.0264	0
СКО, кг	0.015		0.025	

Значения коэффициентов преобразования датчиков при двух испытательных нагрузках приведены в таблице 4.

**Таблица 4** Значения коэффициентов преобразования датчиков

№ п/п	Нагрузка, кг	
	320	1320
К1, кг/ед	0.003013	0.003009
К2, кг/ед	0.002996	0.003007
К3, кг/ед	0.002997	0.002996

Погрешности ВСПМ-1500 приведены в таблице 5.

**Таблица 5** Значения коэффициентов преобразования датчиков

№ п/п	Показатель точности	Полученное значение показателя точности при нагрузке, кг (%)	
		320	1320
1	Случайная составляющая погрешности, кг	0,015 (0,0047)	0,025 (0,0019)
2	Неисключенная систематическая погрешность, кг	0	0
3	Доверительные границы суммарной погрешности при доверительной вероятности 0,95	0.029 (0,0091)	0,050 (0,0038)
4	Расширенная неопределенность результата единичного измерения (при $k=2$ )	0.029 (0,0091)	0,050 (0,0038)

## Приложение Г

### Экспериментальные исследования мерников

ПРОТОКОЛ														
экспериментальных исследований мерника														
Представлен: ООО "ИМС- Индастриз"														
Наименование прибора:		Мерник металлический "OGSB"								Зав.№ 022/1				
Технические хар-ки:		Поверочная жидкость, дистиллированная вода ГОСТ 6709-72.												
		Масса мерника не более 340,0 кг												
Номинальная вместимость		1000,0000 литров.				Значение вместимости		1000,0000 литров.						
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения объема рабочей жидкости						0,007%								
Эталонные СИ: Термометры цифровые ТЦМ 9410Ех/М1 №011-0364 №01С-180 №1322, №01-180 №43, цена деления шкалы 0, 01 °С														
Весы фирмы Тензо - М ВСПМ -1000, d=0,01 кг; составные гири массой 500 кг №- № 2,4 3-го разряда по ГОСТ 8.021-2009														
зав. № 001		Суммарное значение массы мер эталонных,кг				1000,0037 кг								
№ измер	Температура °С.		Атмосферное давление рг.ст	Поправочные коэффициенты		Значение вместимости	Температура °С. воды в мернике	Результаты взвешивания (показания весов)			Действительная вместимость, дм <sup>3</sup>		Относительная погрешность δ, %	
	воздуха	воды		р	п			Гири	Вода	Масса воды, кг	Vt	V20		
1	24,86	24,49	752,07	1,003864	0,99976	1000,000	24,49	1000,36	996,79	996,434	1000,284	1000,043	0,004	
2	24,85	24,74	752,07	1,003928	0,99975		24,74	1000,35	996,72	996,374	1000,288	1000,033	0,003	
Действительное значение вместимости мерника, приведенное к 20 °С, л											1000,0383 дм <sup>3</sup>		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	
											воды	воздуха	№	
											997,1703	1,16498	1	
Заключение:		СИ допускается к применению в качестве мерника металлического эталонного с пределами δ = ± 0,007%.										997,1070	1,16507	2

ПРОТОКОЛ														
экспериментальных исследований мерника														
Представлен: ООО "ИМС- Индастриз"														
Наименование прибора:		Мерник металлический "OGSB"								Зав.№ 022С/2				
Технические хар-ки:		Поверочная жидкость, дистиллированная вода ГОСТ 6709-72.												
		Масса мерника не более 340,0 кг												
Номинальная вместимость		1000,0000 литров.				Значение вместимости		1000,0000 литров.						
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения объема рабочей жидкости						0,007%								
Эталонные СИ: Термометры цифровые ТЦМ 9410Ех/М1 №011-0364 №01С-180 №1322, №01-180 №43, цена деления шкалы 0, 01 °С														
Весы фирмы Тензо - М ВСПМ -1000, d=0,01 кг; составные гири массой 500 кг №- № 2,4 3-го разряда по ГОСТ 8.021-2009														
зав. № 001		Суммарное значение массы мер эталонных,кг				1000,0037 кг								
№ измер	Температура °С.		Атмосферное давление рг.ст	Поправочные коэффициенты		Значение вместимости	Температура °С. воды в мернике	Результаты взвешивания (показания весов)			Действительная вместимость, дм <sup>3</sup>		Относительная погрешность δ, %	
	воздуха	воды		р	п			Гири	Вода	Масса воды, кг	Vt	V20		
1	24,86	24,77	752,07	1,003933	0,99974	1000,000	24,77	1000,35	996,67	996,324	1000,243	999,986	-0,001	
2	24,88	24,81	752,07	1,003943	0,99974		24,81	1000,35	996,68	996,334	1000,263	1000,004	0,000	
Действительное значение вместимости мерника, приведенное к 20 °С, л											999,9954 дм <sup>3</sup>		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	
											воды	воздуха	№	
											997,1020	1,16498	1	
Заключение:		СИ допускается к применению в качестве мерника металлического эталонного с пределами δ = ± 0,007%.										997,0920	1,16498	2



**Продолжение приложения Г**  
**Экспериментальные исследования мерников**

ПРОТОКОЛ																
экспериментальных исследований мерника																
Представлен:		ООО "ИМС- Индустри"														
Наименование прибора:		Мерник металлический "OGSB"							Зав. № 094/1							
Технические хар-ки:		Проверочная жидкость, дистиллированная вода ГОСТ 6709-72. Масса мерника не более 340,0 кг														
Номинальная вместимость		20,0000 литров					Значение вместимости		20,0000 л							
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения объема рабочей жидкости		0,007%														
Эталоны СИ:		Термометр цифровой ПТМ 941 (ЕхМ) №011-0364 №01С-180 №1322, цена деления шкалы 0,01 °С														
Камератор массы фирмы Sartorius CCE 40 K3 № 21906965, $\delta=0,001$ г ;		набор сир № 21825154 (1 кг-10 кг) Е2 1-го разряда по ГОСТ 8.021-2009														
		Суммарное значение массы мер эмалюных, кг					25000,0000 кг									
Дата	№ измер	Температура °С.		Атмосферное давление рг.ст	Поправочные коэффициенты		Значение вместимости	Температура °С. воды в мернике	Результаты взвешивания (показание весов) г		Масса воды, г	Действительная вместимость, л <sup>3</sup>		Относительная погрешность, %		
		воздуха	воды		р	п			Гри	Вола		Vt	V20			
22.07.2014	1	25,40	24,88	768,30	1,003876	0,98974	20,000	24,77	25000,000	19925,990	19925,990	20,00622	20,00010	0,0005		
22.07.2014	2	25,00	24,95	768,30	1,004001	0,98973		24,95	25000,000	19925,650	19925,650	20,00638	20,00007	0,0003		
23.07.2014	3	24,80	24,64	768,30	1,003913	0,98975		24,64	25000,000	19927,055	19927,055	20,00602	20,00004	0,0002		
Действительное значение вместимости мерника, приведенное к 20°С, л											20,00007 л <sup>3</sup>		Плотность, кг/л <sup>3</sup>			
													воды		воздуха	№
Заключение:											СИ допускаются к применению в качестве мерника металлического эмалюного с погрешностями $\delta = \pm 0,007\%$		997,0795		1,187334	1
													997,0660		1,189612	2
													997,1450		1,190614	3



**Продолжение приложения Д**  
**Экспериментальные исследования ТПУ 800**

**ПРОТОКОЛ (лист 3 из 3)**  
экспериментальных исследований (ЭИ) при передаче единицы объема от эталонного мерника к ТПУ

Таблица 4 - Проверка отсутствия протечек (определение коэффициента преобразования счетчика)

№ измер.	Мерник			Счетчик					
	V, м³	tм, °C	Ctstp	N, имп	tсч, °C	Pсч, МПа	Cplm	Ctdw	K, имп/м³
1	1,0030	18,07	0,999901	100715	18,05	0,16	1,000079	0,999996	100429,8912
2	1,0023	18,16	0,999906	100641	18,15	0,12	1,000059	0,999998	100423,5672
3	1,0040	18,18	0,999907	100818	18,16	0,12	1,000059	0,999996	100429,9309
4	1,0023	18,16	0,999906	100641	18,16	0,14	1,000069	1,000000	100424,3657
5	1,0030	18,49	0,999923	100712	18,46	0,08	1,000039	0,999994	100420,9924
6	1,0038	18,50	0,999923	100799	18,49	0,08	1,000039	0,999998	100427,2055
	1,00307	18,26	0,999911	100721	18,25	0,117	1,000057	0,999997	<b>100425,9921</b>

Таблица 5 - Проверка отсутствия протечек (определение вместимости ТПУ)

№ измер.	Направл. поршня	ТПУ		Счетчик				Коэффициенты коррекции				V0Прот, м³	
		tпу, °C	Pту, МПа	K, имп/м³	N, имп	tсч, °C	Pсч, МПа	ТПУ		Счетчик			
								Ctsp	Cpсп	Cplp	Ctdw		Cplm
1	1-3	18,10	0,23	100426	159926	18,10	0,11	0,999936	1,000045	1,000113	1,000000	1,000054	1,592413
	3-1	18,11	0,23	100426	159893	18,12	0,11	0,999936	1,000045	1,000113	0,999998	1,000054	1,592081
	1-3-1												3,18449
2	1-3	18,11	0,23	100426	159904	18,14	0,11	0,999936	1,000045	1,000113	0,999994	1,000054	1,592185
	3-1	18,13	0,23	100426	159896	18,15	0,11	0,999937	1,000045	1,000113	0,999996	1,000054	1,592107
	1-3-1												3,18429
3	1-3	18,14	0,23	100426	159939	18,16	0,11	0,999938	1,000045	1,000113	0,999996	1,000054	1,592534
	3-1	18,15	0,23	100426	159888	18,16	0,11	0,999938	1,000045	1,000113	0,999998	1,000054	1,592029
	1-3-1												3,18456
4	1-3	18,19	0,23	100426	159911	18,19	0,11	0,999939	1,000045	1,000113	1,000000	1,000054	1,592259
	3-1	18,20	0,23	100426	159900	18,21	0,11	0,999940	1,000045	1,000113	0,999998	1,000054	1,592146
	1-3-1												3,18440

Таблица 6 - Результаты ЭИ

Vo, м³	VoПрот, м³	δv, %	Значения метрологических характеристик при доверительной вероятности 0,95								
			θΣ0, %	θV0, %	Sv, %	Sев, %	SΣ, %	KΣ, %	δ0, %	uc, %	U, %
			3,184297	3,184439	0,004	0,0146	0,0059	0,0038	0,0077	0,0086	2,011
Окончание таблицы 6											
			Значения метрологических характеристик при доверительной вероятности 0,99								
			0,0186	0,0084	0,0038	0,0077	0,0086	2,669	<b>0,023</b>	0,0086	0,0257

**ПРОТОКОЛ (лист 1 из 3)**  
экспериментальных исследований (ЭИ) при передаче единицы объема от эталонного мерника к ТПУ

Тип ТПУ:	<b>OGSB - 800</b>	Тип счетчика:	<b>ST-75-SS</b>	Температура воздуха возле мерника, °C	18,0
Заводской номер:	107-2	Заводской номер:	18KK-116248	Температура воздуха возле ТПУ, °C	18,0
Детекторы:	2 & 4			Поверочный расход, м³/ч:	Qп1= 20,0 Qп2= 10,0
Тип мерника:	<b>OGSB</b>			Место проведения ЭИ:	ООО "Системы Нефть и Газ Балтия"
Заводской номер:	012				

Таблица 1 - Исходные данные

Vм, м³	F, 1/МПа	β, 1/°C	αт, 1/°C	αм, 1/°C	E, МПа	D, мм	S, мм	Δtm, °C	Δtсч, °C	Δtпу, °C	θM0,95, %	θивкк, %	θивкн, %
1,000021	4,91E-04	2,60E-04	1,120E-05	1,709E-05	2,10E+05	387,34	9,53	0,1	0,1	0,1	0,01	0,005	0,005

Окончание таблицы 1

псч	ппу	t0,95 счетчика	t0,95 ТПУ	t0,99 счетчика	t0,99 ТПУ
10	11	2,262	2,228	3,250	3,169

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

Таблица 2 - Определение метрологических характеристик объемного счетчика

№ измер.	Мерник			Счетчик						
	V, м³	tм, °C	Ctstp	N, имп	tсч, °C	Pсч, МПа	Cplm	Ctdw	K, имп/м³	S0сч, %
1	1,0037	17,89	0,999892	100733	17,86	0,14	1,000069	0,999994	100377,9070	
2	1,0029	17,48	0,999871	100658	17,42	0,14	1,000069	0,999989	100385,8175	
3	1,0032	17,41	0,999867	100677	17,38	0,14	1,000069	0,999995	100374,5598	
4	1,0010	17,50	0,999872	100462	17,50	0,12	1,000059	1,000000	100378,3515	
5	1,0030	17,60	0,999877	100679	17,60	0,12	1,000059	1,000000	100394,0674	0,008
6	1,0030	17,92	0,999893	100688	17,96	0,09	1,000044	1,000007	100399,1744	
7	1,0023	18,04	0,999900	100593	18,02	0,09	1,000044	0,999996	100374,9947	
8	1,0036	18,13	0,999904	100739	18,10	0,09	1,000044	0,999994	100390,1960	
9	1,0028	18,17	0,999906	100652	18,16	0,09	1,000044	0,999998	100382,9363	
10	1,0022	18,19	0,999907	100600	18,20	0,09	1,000044	1,000002	100390,6630	0,008
	1,00277	17,83	0,999889	100648	17,82	0,111	1,000055	0,999998	<b>100384,8668</b>	









Приложение Ж  
Сертификат NMI на СИКН




EC type-examination  
Certificate

Number **T10404** revision 0  
Project number 11200736  
Page 1 of 1

Issued by	NMI Certin B.V., designated and notified by the Netherlands to perform tasks with respect to conformity modules mentioned in article 9 of Directive 2004/22/EC, after having established that the Measuring instrument meets the applicable requirements of Directive 2004/22/EC, to:
Manufacturer	Oil and Gas Systems Baltia Ltd. 41 Portovaya str., Kaliningrad 236039, Russia
Measuring instrument	An (non) interruptible <b>measuring system</b> on a skid Type : MSOQ Destined for the measurement of : oil and oil products with viscosities between 1 and 23 cSt and 700 and 1500 kg/m <sup>3</sup> . Accuracy class : 0.3 Environment classes : M1 / E1 Temperature range liquid : +5 °C / +55 °C Temperature range ambient : -25 °C / +40 °C Q <sub>min</sub> - Q <sub>max</sub> : 120 - 1200 m <sup>3</sup> /h Minimum measured quantity : See § 1.2 of the description  Further properties are described in the annexes: - Description T10404 revision 0; - Documentation folder T10404-1.
Valid until	18 June 2022
Remarks	The measuring system is approved to measure volume and present converted volume and mass.

Issuing Authority **NMI Certin B.V., Notified Body number 0122**  
18 June 2012

  
C. Oosterman  
Head Certification Board

**NMI Certin B.V.**  
Hugo de Grootplein 1  
3314 EG Dordrecht  
The Netherlands  
T +31 78 6332332  
certin@nmi.nl  
www.nmi.nl

This document is issued under the provision that no liability is accepted and that the applicant shall indemnify third-party liability.  
The designation of NMI Certin BV, as Notified Body can be verified at <http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/ndb/>

Parties concerned can lodge objection against this decision, within six weeks after the date of submission, to the general manager of NMI (see [www.nmi.nl](http://www.nmi.nl)).

Reproduction of the complete document only is permitted.

