

Федеральное агентство по образованию  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
“Санкт-Петербургский государственный университет”  
Физический факультет

---

На правах рукописи

**Садковская Ирина Владимировна**

Разработка и исследование лазерного интерференционного  
жидкостного манометра высшей точности с целью  
повышения уровня обеспечения единства измерений  
низкого абсолютного давления

Специальность 05.11.15 "Метрология и метрологическое обеспечение"

***Автореферат***

*диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук*

Санкт-Петербург  
2006

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы.

Необходимость обеспечения единства измерений низкого абсолютного давления в СССР привела к созданию в 1973 г. во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ) государственного эталона (ГЭ) единицы давления для области низкого абсолютного давления.

Создание ГЭ явилось результатом научных исследований известных ученых - метрологов М.А. Гуляева, А.В. Ерюхина, В.А. Рыжова. В основной состав ГЭ входили следующие средства измерений (СИ) высшей точности, обеспечивавшие воспроизведение единицы давления: набор из четырех компрессионных ртутных манометров, мембранно-емкостный манометр и установка с калиброванными объемами.

В настоящее время в состав ГЭ единицы давления (ГЭТ 49-80) входят мембранно-емкостные вакуумметры и специальная аппаратура для создания и поддержания низкого абсолютного давления. В соответствии с ГОСТ 8.107-81 ГЭ возглавляет государственную поверочную схему (ГПС) для СИ давления в диапазоне  $1 \cdot 10^{-8}$  -  $1 \cdot 10^3$  Па.

Сегодня национальные эталоны единицы низкого абсолютного давления передовых стран мира, применяемые в ведущих метрологических институтах - NIST (США), NPL-UK (Великобритания), IMGC-CNR (Италия), NRLM (Япония), CSIRO (Австралия), - используют в качестве основы жидкостные манометры с интерференционными измерителями разности уровней. Причина этого – высокая точность таких манометров и возможность определения давления на основании прямых измерений основных величин Международной системы единиц – длины и массы, и использовании значения ускорения свободного падения.

Потребности приоритетных направлений развития науки, технологий и техники России в создании и развитии критических технологий дали толчок к

обновлению парка СИ низкого абсолютного давления. Получили применение прецизионные специализированные измерители и преобразователи давления нового поколения с повышенной точностью, расширенными диапазонами измерений и улучшенными функциональными возможностями. Это требует общего повышения уровня обеспечения единства измерений низкого абсолютного давления в стране, как в части создания новых более точных средств поверки и калибровки, так и в части повышения точности ГЭ. Проведенные в этой связи в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ) и во ВНИИМ в последние годы исследования показали, что одним из наиболее эффективных путей решения этой проблемы является создание U-образного лазерного интерференционного жидкостного манометра (ИЖМ), способного в настоящее время обеспечить высшую точность измерений. Это свойство ИЖМ позволяет использовать его как в основном составе ГЭ для повышения точности воспроизведения единицы давления, так и в составе рабочих (вторичных) эталонов (РЭ), создание которых предусмотрено ГПС. Вполне возможно и актуально применение интерференционных жидкостных манометров в качестве компараторов давления, а также в потокометрических вакуумных установках.

В связи с изложенным выше важность и актуальность диссертационной работы представляется очевидной.

### **Цель работы.**

Целью диссертационной работы является разработка и исследование лазерного интерференционного жидкостного манометра высшей точности для повышения уровня обеспечения единства измерений низкого абсолютного давления.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести аналитический обзор существующих наиболее точных методов и СИ низкого абсолютного давления (включая национальные эталоны промышленно развитых стран) и осуществить выбор направления работы;

- разработать конструкцию, изготовить и испытать макет ИЖМ;
- теоретически и экспериментально исследовать влияние молекулярных свойств рабочей жидкости на точность измерений давления ИЖМ;
- провести исследование метрологических и технических характеристик макета ИЖМ с последующим анализом и оценкой результатов исследований.

### **Новизна результатов исследований.**

1. Создан действующий макет лазерного интерференционного жидкостного манометра высшей точности, который является первой в истории отечественной метрологии разработкой, направленной на построение современного эталона единицы давления для области низкого абсолютного давления, имеющей положительные результаты.

Получен патент РФ на изобретение "Лазерный интерференционный масляный манометр".

2. Предложен и реализован новый метод уменьшения поверхностных колебаний рабочей жидкости в масляном ИЖМ с помощью поплавков - демпферов специальной конструкции, позволивший существенно снизить уровень составляющей погрешности измерений давления от влияния случайных вибраций и расширить диапазон измерений давления.

3. Впервые предложен и осуществлен метод определения составляющей погрешности измерений давления ИЖМ, обусловленной капиллярными явлениями, основанный на прямых измерениях кривизны поверхности рабочей жидкости с помощью оптического интерферометра.

4. С помощью разработанных алгоритмов и программ численного решения математической задачи о форме поверхности жидкости получена зависимость радиуса кривизны мениска от радиуса манометрической трубки ИЖМ, а также получено значение коэффициента поверхностного натяжения масла ВМ-1 по методу висящей капли.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Создан и исследован макет U-образного лазерного ИЖМ, позволивший доказать возможность разработки СИ давления высшей точности в диапазоне  $5 \div 1000$  Па.

2. Создана и исследована специальная конструкция поплавков-демпферов для масляного манометра, снижающих уровень интерференционных шумов, связанных с вибрациями (от 2-3 до 0,01-0,03 интерференционной полосы), и уменьшающих влияние капиллярных явлений на погрешность ИЖМ.

3. Предложен и реализован новый вариант оптической схемы лазерного интерферометра, наиболее просто решающий задачу формирования квадратурных интерференционных сигналов и задачу уменьшения влияния излучения, возвращенного интерферометром, на работу лазера.

4. Предложен и осуществлен метод определения составляющей погрешности измерений давления ИЖМ, обусловленной капиллярными явлениями, основанный на прямых измерениях кривизны поверхности рабочей жидкости с помощью оптического интерферометра.

5. С помощью разработанной программы рассчитана зависимость кривизны мениска от радиуса трубок лазерного интерференционного манометра.

6. Разработан алгоритм и программа расчета для метода экспресс – анализа коэффициента поверхностного натяжения жидкости по геометрическим размерам висящей капли.

**Личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации.**

Автор диссертационной работы лично

- разработал проект и принимал участие в создании макета лазерного интерференционного масляного манометра (ИЖМ) высшей точности;

- провел теоретическое исследование источников погрешности манометра и экспериментальное определение составляющей погрешности, связанной с капиллярными явлениями, предложенным им методом;

- провел испытания разработанного ИЖМ, в том числе, во время международных сличений эталонов России и Республики Словакия;

- провел измерение коэффициента поверхностного натяжения масла (рабочей жидкости ИЖМ) с помощью разработанной им методики;

- в результате проведенных на ЭВМ расчетов получил форму мениска рабочей жидкости ИЖМ и зависимость радиуса его кривизны от диаметра манометрической трубки;

- исследовал метрологические характеристики макета ИЖМ.

### **Практическая значимость.**

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при создании ГЭ и РЭ единицы давления нового поколения и компараторов давления с целью повышения уровня обеспечения единства измерений низкого абсолютного давления, а также при создании потокометрических вакуумных установок.

Разработка макета ИЖМ была включена на конкурсной основе в Программу важнейших прикладных научно-исследовательских, опытно-конструкторских, технологических работ ГНЦ РФ "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева" на 2001 – 2003 гг., раздел 3.4, № ГР 01.2.001.07654 и № ГР 01.2002.03204 раздела "Исследования и разработки, выполняемые государственными научными центрами Российской Федерации" ФЦНТП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники" на 2002-2006 гг.

### **Апробация работы.**

Результаты работы были представлены на следующих конференциях и семинарах:

- Четвертый международный семинар – совещание "Разработка, производство, применение и метрологическое обеспечение средств измерения давления и вакуума" 25-27 апреля 2000 г., Санкт-Петербург;

- Вторая всероссийская научно-техническая конференция (Computer-Based Conference) "Методы и средства измерений". Октябрь 2000 г., Нижний Новгород;

- Третья всероссийская научно-техническая конференция (Computer-Based Conference) "Методы и средства измерений". Август 2001 г., Нижний Новгород;

- Пятая всероссийская научно-техническая конференция (Computer-Based Conference) "Методы и средства измерений". Май 2002 г., Нижний Новгород;

- Научно-технический семинар в PIE (Институт промышленной электроники). 20 февраля 2003г., г. Варшава, Польша;

- Научно-технический семинар "Вакуумная техника и технология - 2003". Июнь 2003г., Санкт-Петербург;

- Научно-технический семинар "Вакуумная техника и технология - 2004". Июнь 2004г., Санкт-Петербург;

- Международный вакуумный конгресс (IVC-16). 28 июня-2 июля 2004г., Венеция, Италия;

- Европейский вакуумный конгресс (EVC-9). 5-7 апреля 2005г., Париж, Франция.

### **Публикации.**

Результаты работы изложены в 10-ти публикациях, получен патент на изобретение.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, заключения, списка используемой литературы из 93-х наименований (из них 50 отечественных, 38 иностранных, 5 нормативно-технических) и 5-ти приложений. Общий объем работы

составляет 140 страниц, в том числе 28 рисунков, 8 таблиц, 3 компьютерные программы.

Диссертация выполнена на кафедре Общей физики-1 физического факультета СПбГУ по результатам экспериментальных и теоретических исследований, проведенных в СПбГУ и в НИО 231 ВНИИМ в период с 1999 г. по 2004 г.

### **Содержание работы.**

**Во введении** дана общая характеристика диссертации. Определены цель диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен аналитический обзор наиболее точных методов и СИ низкого абсолютного давления, дана их классификация и принципы действия. Выбор направления исследований был определен исходя из следующих факторов:

1. В области измерений давления существуют два абсолютных метода, обеспечивающих высшую точность измерений –грузопоршневой и жидкостный (гидростатический) метод.

2. Создание в 60-х годах 20-го века лазеров обеспечило сегодня возможность достижения максимальной точности в некоторых видах измерений и, в первую очередь, при измерениях длин и перемещений. Применение лазерного интерференционного отсчетного устройства для измерений разности уровней жидкости в коленах U-образного манометра в настоящее время позволяет получить чувствительность, равную сотым и даже тысячным долям интерференционной полосы, что соответствует приращению давления  $\sim 10^{-6}$  Па.

3. В большинстве стран мира в национальных эталонах единицы давления в области среднего и низкого абсолютного давления использован гидростатический метод измерений.

Перечисленные факторы определили основное направление работы - создание и исследования макета U-образного лазерного ИЖМ, обеспечивающего



высшую точность измерений в диапазоне низкого абсолютного давления, на основе известного уравнения измерений:

$$P - P_0 = \rho gh ,$$

где:  $P - P_0$  – разность давлений в коленах U-образной трубки;

$\rho$  - плотность жидкости;

$g$  - ускорение свободного падения;

$h$  - разность уровней жидкости в коленах манометра.

Несомненным преимуществом ИЖМ является также возможность автоматизации процесса измерения.

**Во второй главе** рассмотрены принципы и особенности реализации лазерного интерференционного метода измерения линейных перемещений. Установлено, что специфика применения лазерных интерферометров к жидкостным манометрам состоит в том, что зеркалами интерферометра являются свободные поверхности жидкости. Это неизбежно приводит к высокому уровню шумов интерференционной картины и к частичному возвращению света в лазер, что может нарушать его работу.

Рассмотрены описанные в литературе способы и особенности реализации лазерного интерференционного метода измерения линейных перемещений в применении к жидкостным манометрам.

Теоретически рассмотрены и оценены источники погрешности и возможные поправки при измерении давления газа лазерным ИЖМ.

Обоснован выбор масла для диффузионных вакуумных насосов марки VM-1 (ОСТ 38.01402-86 "Индустриальные масла") в качестве рабочей жидкости разрабатываемого манометра. При создании манометра с диапазоном от 0,1 до 1000 Па масло предпочтительнее ртути так как:

- меньшая плотность масла (приблизительно в 15 раз) обуславливает повышение во столько же раз чувствительности интерферометра к изменению давления;

- более низкое давление паров масла (на 3-4 порядка) способствует уменьшению остаточного давления  $P_0$  в откачиваемом колене манометра;
- более высокая вязкость масла обеспечивает более низкий уровень шумов интерференционной картины, вызванных поверхностными волнами в жидкости.

В **третьей главе** описана конструкция макета ИЖМ для измерений низкого абсолютного давления. Основными составными частями ИЖМ являются:

- измерительная ячейка, состоящая из U - образного манометра и лазерного интерферометра;
- аппаратура для создания и поддержания низкого абсолютного давления, в состав которой входят: измерительная камера, вакуумный откачной пост и система напуска газа;
- виброзащитное устройство;
- устройство сопряжения ИЖМ с ПЭВМ.

Схема измерительной ячейки ИЖМ изображена на рис.1. Интерферометр построен по схеме Майкельсона, в которой зеркалами служат свободные поверхности масла в коленах манометра. Его делительная пластинка 1 и поворотная призма 2 закреплены с помощью плоских стальных пружин 3 на основании 4 и оснащены настроечными микрометрическими винтами 5, один из которых находится с задней стороны и на рис.1 не указан. Источником света для интерферометра служит частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер типа ЛГН-302, в излучении которого выделена одна продольная мода с линейной поляризацией и длиной волны  $\lambda = 632,9$  нм. Для обеспечения возможности реверсивного счета интерференционных полос применен известный способ смешения пучков с линейной и круговой поляризациями, который реализован следующим образом. Пучок лазера после поворотной призмы 6 проходит через поляризатор 7, ориентированный под углом  $45^0$  к плоскости падения на делительную пластинку 1. Пройдя напрямую колено, он на выходе интерферометра сохраня-

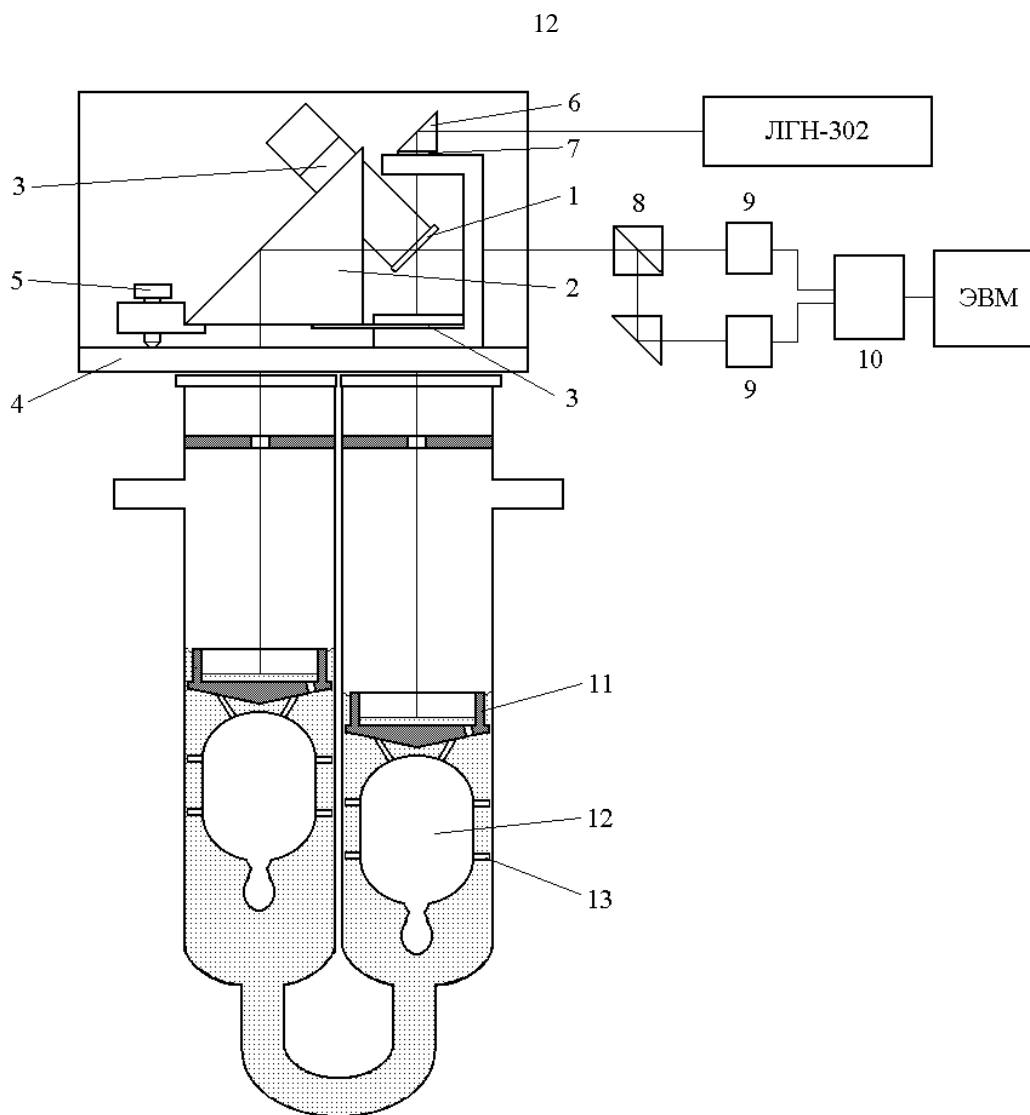


Рис.1. Схема измерительной ячейки ИЖМ.

ет линейную поляризацию. Второй пучок два раза проходит поворотную призму полного внутреннего отражения 2, которая поставлена вместо обычно применяемого поворотного зеркала. При этом он приобретает эллиптическую поляризацию, близкую к круговой. На выходе интерферометра пучки света проходят через поляризационный делитель 8, который формирует квадратурные сигналы интерференции, регистрируемые двумя фотодиодами 9. Совмещение в призме 2 двух функций, отражателя и четвертьволновой пластинки, обеспечивает предельную простоту оптической схемы. Кроме того, поляризатор 7 обеспе-

чивает потери интенсивности возвращенного света, достаточные, чтобы лазер работал в нормальном режиме. Аналоговые сигналы с фотодиодов поступают в блок сопряжения 10, где они преобразуются в счетные импульсы.

U - образный манометр выполнен в виде стеклянной трубки с внутренним диаметром 37 мм и длиной 350 мм. Интерферометр установлен непосредственно на торцевых окошках манометра.

Для подавления поверхностных волн масла в манометре применены специально сконструированные поплавки - демпферы, реализующие использование известного свойства тонкого слоя жидкости гасить поверхностные волны (рис. 1). Поплавок - демпфер состоит из фторопластовой чаши 11, поддерживаемой на плаву стеклянным баллоном 12. Его размеры и вес частей подобраны так, что слой масла над плоским дном чаши составляет около 0,5 мм, что обеспечивает снижение интерференционных шумов на два порядка (с 2-3 до 0,01-0,03 интерференционной полосы). Смещения поплавков - демпферов поперек оси ограничены боковыми выступами 13.

Предложенный метод подавления поверхностных волн в масляном ИЖМ представляет альтернативу единственному описанному в литературе, технически более сложному, методу воздушной подвески всей установки.

**В четвертой главе** изложены результаты теоретического и экспериментального исследования влияния молекулярных свойств масла на погрешность измерения давления.

В основу исследования составляющей погрешности, обусловленной поверхностным натяжением жидкости, положено гидростатическое уравнение ИЖМ, которое с учетом известной формулы Лапласа для скачка давления на границе раздела двух сред, имеет вид:

$$P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h + \left( \frac{2\sigma}{R_1} - \frac{2\sigma}{R_2} \right),$$

где:  $P_1$  и  $P_2$  – давления газа в коленах манометра;

$\rho$ ,  $\sigma$  - плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкости;

$g$  – ускорение свободного падения;

$h$  – разность уровней жидкости в коленах манометра;

$R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны менисков в центре.

Это уравнение позволяет связать погрешность измеряемого давления с флуктуациями кривизны мениска.

Исследование проведено в три этапа:

1. Измерен коэффициент поверхностного натяжения масла с помощью разработанной методики компьютерной обработки фотографического изображения висячей капли жидкости, суть которой состоит в следующем. По изображению капли измерены ее диаметр в самой узкой (перетяжка) и в самой широкой частях, а также ее длина. Дифференциальное уравнение для образующей поверхности капли в системе координат с началом в центре перетяжки с осью  $x$  - вдоль и осью  $y$  - поперек оси капли имеет вид:

$$\frac{1}{y_0} - \frac{1}{R} + \frac{\rho g x}{\sigma} = \frac{1}{y \cdot (1 + y'^2)^{1/2}} - \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}},$$

где:  $y_0$  – радиус кривизны поверхности капли в перетяжке в горизонтальном сечении,  $R$  – в вертикальном.

Уравнение содержит два неизвестных параметра – коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  и кривизну в области перетяжки  $R$ . Сначала при произвольных значениях этих параметров строят решение уравнения методом Рунге-Кутты (виртуальную каплю). Затем параметры варьируют таким образом, чтобы геометрические размеры виртуальной капли совпали с измеренными значениями. При этом дополнительно контролируют выполнение уравнения механического равновесия капли:

$$\rho \cdot g \cdot V + \pi \cdot y_0^2 \cdot \sigma \cdot \left( \frac{1}{y_0} - \frac{1}{R} \right) = 2\pi \cdot y_0 \cdot \sigma,$$

где  $V$  – рассчитанный объем капли.

Проверка методики на жидкостях с известными свойствами (спирт, глицерин, вода) дала согласие с табличными данными с отклонением не более

2-3%. В результате измерений коэффициента поверхностного натяжения масла марки ВМ-1 получено значение  $(3,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$  Н/м.

2. Проведено исследование зависимости кривизны мениска в центре от радиуса манометрической трубки. Дифференциальное уравнение образующей мениска в системе координат с вертикальной осью  $y$  вдоль оси трубки и горизонтальной  $x$  – вдоль радиуса имеет вид:

$$\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} + \frac{y'}{x(1+y'^2)^{1/2}} = \frac{\rho g}{\sigma} \cdot y + \frac{2}{R_0},$$

где  $R_0$  – радиус кривизны мениска в центре.

С помощью ЭВМ численным методом построено семейство решений уравнения, зависящее от двух параметров: радиуса кривизны на оси и краевого угла на стенке манометрической трубки, из которого получена в графическом виде искомая зависимость радиуса кривизны мениска в центре от радиуса манометрической трубки (рис. 2).

3. Экспериментально исследованы флуктуации радиуса кривизны мениска в процессе измерения давления, которые непосредственно определяют его погрешность. Для этого с помощью интерферометра Майкельсона, видеокамеры и ЭВМ регистрировали картину интерференции плоской волны и сферической волны, отраженной от поверхности масла. В выборке фотографий, полученных при различных давлениях, были рассчитаны радиусы кривизны в центре мениска, их среднее значение и среднее квадратическое отклонение (СКО). Расчеты показали, что относительное СКО флуктуаций радиуса кривизны составляет 2,7%. Этот результат использован для вычисления составляющей погрешности измерений ИЖМ, связанной с капиллярными явлениями.

**В пятой главе** приведены результаты исследований метрологических характеристик разработанного макета ИЖМ.

Уравнение измерений ИЖМ имеет вид:

$$P = \rho_{20} \left[ -\beta \left( -20 \right) \right] g \cdot \frac{N}{2} \lambda_0 \cdot \left[ 1 - \alpha \left( H + \frac{N \lambda_0}{4} \right) \right] + P_0,$$

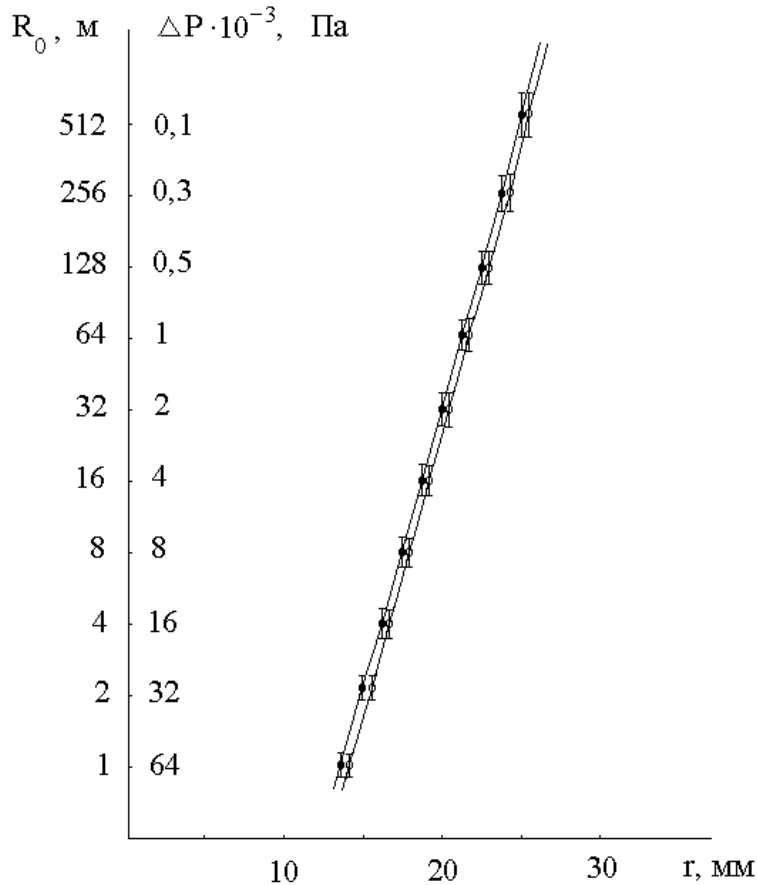


Рис.2 Расчетная зависимость радиуса кривизны мениска в центре от радиуса манометрической трубки (в каждой паре точек на графике левая соответствует углу наклона поверхности жидкости на стенке трубки, равному  $40^\circ$ , правая -  $60^\circ$ )

где:  $P$  – измеряемое давление;

$\rho_{20}$  – плотность масла при  $20,0^\circ\text{C}$ ;

$\beta = 7,09 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$  - температурный коэффициент плотности, рассчитанный на основе данных, представленных лабораторией госэталонов в области измерения массы, плотности и вязкости ВНИИМ;

$t$  - температура масла,  $^\circ\text{C}$ ;

$g = 9,81931 \text{ м/с}^2$  - значение ускорения свободного падения;

$N$  – количество сосчитанных интерференционных полос;

$\lambda_0 = 6,329910 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  - длина волны лазера в вакууме;

$P_0$  – остаточное давление в колене сравнения;

$\alpha = 2,29 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$  - коэффициент, рассчитанный из зависимости показателя преломления газа от давления в измерительном колене манометра;

$H = 0,15 \text{ м}$  - длина части колена манометра от оптического окошка до поверхности масла в откаченном манометре.

Диапазон измерений макета ИЖМ составляет  $1 \div 1000 \text{ Па}$ . Основные составляющие погрешности измерений давления ИЖМ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Источник погрешности	Погрешность измерений давления ИЖМ		
	Систематическая (относительная)	Случайная (СКО)	Выраженная в единицах давления $P$ , Па
Погрешность измерений плотности $\rho$ рабочей жидкости	$1 \cdot 10^{-4}$		$1 \cdot 10^{-4} P$
Погрешность измерений ускорения свободного падения $g$	$1 \cdot 10^{-6}$		$1 \cdot 10^{-6} P$
Погрешности измерений разности уровней $h$ рабочей жидкости:			
- нестабильность длины волны $\lambda$ лазера ЛГН-302	$1 \cdot 10^{-7}$		$1 \cdot 10^{-7} P$
- нестабильность нуля		$1-2 \lambda$	$(5-10) \cdot 10^{-3} \text{ Па}$
- дискретность отсчета		$1/4 \lambda$	$1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$
- погрешность, обусловленная капиллярными явлениями		$1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$	$1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$
- "косинусная ошибка"	$5 \cdot 10^{-7}$		$5 \cdot 10^{-7} P$

В результате проведенных исследований СКО случайной погрешности измерений давления созданным ИЖМ оценивается значением  $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ . В настоящий момент основной вклад в эту составляющую вносит погрешность, связанная с дрейфом нуля, которая обусловлена нестабильностью пространственной неоднородности температуры в коленах U-образного манометра. Анализ



литературных источников позволяет предположить, что эта составляющая погрешности может быть уменьшена до значения  $0,5 \cdot 10^{-3}$  Па путем термостатирования измерительной ячейки манометра.

Граница неисключенной систематической погрешности ИЖМ оценивается значением 0,01 % от измеряемого давления. Основной вклад в эту составляющую вносит погрешность определения плотности, которая на настоящий момент оценена значением  $1 \cdot 10^{-4}$ . Анализ литературных данных показывает, что эта погрешность может быть уменьшена практически на порядок путем вычисления поправок к измеренному значению плотности масла на обезгаженность и сжимаемость.

Рассчитаны доверительные границы погрешности измерений давления ИЖМ -  $\Delta_p$ .

В табл. 2 приведены метрологические характеристики как существующего макета ИЖМ, так и прогнозируемые характеристики предполагаемого к соз-

Таблица 2

Объект сравнения		Наименование показателей			
		Диапазон измерений, Па	Характеристики погрешности		
			СКО, %	НСП, %	$\Delta_p$ , % и (или) Па
ИЖМ (ВНИИМ, Россия)	макет	$1 \div 10^3$	$1 \div 1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$(3 \div 2 \cdot 10^{-2}) \%$
	прогноз	$0,1 \div 5 \cdot 10^3$	$1 \div \sim 10^{-4}$	$\sim 10^{-3}$	$(3 \div \sim 10^{-3}) \%$
ГЭТ 49-80 (ВНИИМ, Россия)		$10^{-3} - 10^3$	0,3	0,3	1,0 %
Лазерный интерференционный масляный манометр (NPL-UK, Великобритания)		$0,3 \div 6$	$0,5 \div 2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$\pm(1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Па} + 0,05\%)$
Лазерный интерференционный масляный манометр (NRLM, Япония)		$0,1 \div 1 \cdot 10^3$	$2,1 \div 2 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$(2,1 + 0,032P/\text{Па}) \cdot 10^{-3} \text{ Па}$
Ультразвуковой интерференционный масляный манометр (NIST, США)		до $1,4 \cdot 10^2$	$0,8 \div 6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-2}$	данные отсутствуют

данию эталонного ИЖМ в сравнении с метрологическими характеристиками ГЭ и национальных эталонов Великобритании, Японии и США.

Анализ данных табл.2 показывает возможность значительного повышения точностных характеристик ГЭ в диапазоне  $5 \div 1000$  Па путем введения в его состав эталонного ИЖМ и позволяет сделать вывод о перспективности создания ГЭ нового поколения, характеристики которого будут соответствовать уровню лучших зарубежных аналогов.

Приведены результаты испытаний макета ИЖМ, полученные в процессе международных сличений национальных эталонов России и Республики Словакия в рамках проекта КОOMET 235/RU/01, которые, в свою очередь, подтвердили высокие точностные характеристики ИЖМ.

### **Заключение**

Исследования, проведенные в диссертационной работе, показали, что наиболее эффективным путем решения проблемы повышения уровня обеспечения единства измерений абсолютного давления в диапазоне  $5 - 1000$  Па является создание лазерного интерференционного масляного манометра, способного в настоящее время обеспечить высшую точность измерений.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Проведен аналитический обзор наиболее точных методов и средств измерений низкого абсолютного давления.

2. Разработан и создан макет ИЖМ для воспроизведения абсолютного давления в диапазоне  $1 \div 1000$  Па, в состав которого входят:

- измерительная ячейка, состоящая из U-образного масляного манометра и лазерного интерферометра;
- аппаратура для создания и поддержания низкого абсолютного давления;
- электронное устройство сопряжения ИЖМ с ПЭВМ.

При этом конструкция измерительной ячейки ИЖМ позволяет:

- на два порядка снизить уровень интерференционных шумов, обусловленных поверхностными волнами рабочей жидкости с помощью плавающих поплавков-демпферов, а также уменьшить влияние капиллярных явлений на погрешность ИЖМ;

- сформировать квадратурный интерференционный сигнал и устранить влияние возвращенного излучения на работу лазера путем совмещения в одном оптическом элементе (призме полного внутреннего отражения) двух функций: отражателя света и пластинки  $\lambda/8$ , и установки на входе интерферометра поляроида, ориентированного под углом  $45^\circ$  к плоскости падения луча на делительную пластинку.

3. Предложен и осуществлен новый метод определения составляющей погрешности жидкостных манометров, обусловленной капиллярными явлениями, который состоит в исследовании флуктуаций кривизны поверхности жидкости в трубках манометра. Метод основан на прямых измерениях кривизны с помощью оптического интерферометра и последующей статистической обработке результатов.

4. С помощью разработанных алгоритмов и программ рассчитана зависимость кривизны мениска от радиуса трубок лазерного интерференционного манометра и получено значение коэффициента поверхностного натяжения для использованного в качестве рабочей жидкости манометра вакуумного масла марки VM-1.

5. На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований определены метрологические характеристики разработанного макета ИЖМ:

- диапазон измерений  $1 \div 1000$  Па;
- СКО случайной погрешности  $1,0 \cdot 10^{-2}$  Па;
- граница НСП 0,01 %.

6. Результаты испытаний ИЖМ, проведенных в процессе международных сличений национальных эталонов России и Республики Словакия, подтвердили высокие точностные характеристики ИЖМ.

7. Сравнение метрологических характеристик существующего макета ИЖМ и прогнозируемых характеристик созданного в будущем на его основе эталонного СИ с метрологическими характеристиками ГЭТ 49-80 и национальных эталонов Великобритании, Японии и США показывает возможность значительного повышения точностных характеристик ГЭ в диапазоне  $5 \div 1000$  Па путем введения в его состав эталонного ИЖМ и позволяет сделать вывод о перспективности создания ГЭ нового поколения, не уступающего по своим метрологическим характеристикам лучшим зарубежным аналогам.

8. Проанализирована возможность и указаны пути уменьшения как случайной, так и систематической составляющей погрешности ИЖМ в 3-5 раз, что позволит расширить диапазон измерений в область более низких давлений (менее 1 Па), сохраняя при этом высокую точность измерений.

9. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования влияния капиллярных явлений на точность измерения низкого абсолютного давления с помощью жидкостных манометров, а также результаты исследований макета ИЖМ могут быть использованы как для повышения точности воспроизведения единицы давления ГЭ, так и при создании РЭ, предусмотренных ГПС. Кроме того, интерференционные жидкостные манометры могут применяться в качестве компараторов давления, а также в потокометрических вакуумных установках.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Садковская И.В., Эйхвальд А.И. Жидкостный манометр с интерференционным отсчетом для измерения давления газа // Четвертый международный семинар-совещание "Разработка, производство, применение и метрологическое обеспечение средств измерения давления и вакуума": Тез. докл. СПб., 2000. С.36-37.

2. Садковская И.В. Интерференционный жидкостный манометр // 2-ая Всероссийская научно-техническая конференция (Computer-Based Conference): Тез. докл. Н. Новгород, 2000. С.26.

3. Садковская И.В. Виброзащитное устройство интерференционного жидкостного манометра // Материалы 3-ей Всероссийской научно-технической конференции (Computer-Based Conference). Н. Новгород. 2001. С.20.

4. Садковская И.В. Измерение низкого абсолютного давления газа интерференционным жидкостным манометром // Материалы 5-ой Всероссийской научно-технической конференции (Computer-Based Conference). Н.Новгород. 2002. С.44.

5. Горобей В.Н., Леонтьев В.Н., Садковская И.В., Эйхвальд А.И. Эталонная аппаратура для воспроизведения единицы давления в области низких абсолютных давлений // Вакуумная техника и технология. 2002. Т.12, №1. С.23 – 25.

6. Садковская И.В., Эйхвальд А.И. Интерференционный U-образный масляный манометр для измерения низкого абсолютного давления // Вакуумная техника и технология. 2003. Т.13, №2. С.101-106.

7. Садковская И.В., Эйхвальд А.И. Определение метрологических характеристик интерференционного U-образного масляного манометра // Вакуумная техника и технология. 2004. Т.14, №2. С.103-106.

8. Sadkovskaya I.V., Eichwald A.I. "Special floats for intereferometric oil manometer ", Abstracts of 16-th International Vacuum Congress (June 28 - July 2, 2004, Venice, Italy), Posters. P. 1012.

9. Садковская И.В., Эйхвальд А.И. Влияние капиллярных эффектов на точность измерения давления жидкостными манометрами. // Измерительная техника. 2005. №3. С. 24-26.

10. Садковская И.В., Эйхвальд А.И. Лазерный интерференционный масляный манометр // Патент РФ № 2262677. 20.10.2005. Бюл. № 29.

11. Sadkovskaya I.V., Eichwald A.I. "Correct estimation of the capillary uncertainty of an interferometric float-tipe oil manometer", Abstracts of the 9-th European Vacuum Conference (5-7 April, 2005, Paris, France), P. 38.