

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ИМ. В.П.ДЖЕЛЕПОВА

На правах рукописи



КАКОРИН ИГОРЬ ДМИТРИЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
БЕССЕПАРАЦИОННЫХ РАСХОДОМЕРОВ
МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ
СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ
ЭНЕРГИЙ И НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Дубна 2021

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель – *Архаров Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор*

Официальные оппоненты – *Гречко Александр Григорьевич, доктор технических наук, ООО "Газпром ВНИИГАЗ", главный научный сотрудник*
Нурмухаметов Рустем Радикович, кандидат технических наук, Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии - филиал федерального государственного унитарного предприятия "Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева", начальник научно-исследовательского отдела метрологического обеспечения средств и систем измерений расхода и количества нефти, нефтепродуктов, сжиженного природного газа и низкотемпературных жидкостей

С электронной версией диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil/dissertations>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Г.А. Карамышева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что необходимость измерения паросодержания и расхода в двухфазных криогенных потоках возникает во многих областях современной техники. В сверхпроводящих ускорителях элементарных частиц и ионов высоких энергий необходимо поддерживать заданный температурный режим в крупных сверхпроводящих магнитах, резонаторах и шинах питания.

В аэрокосмической отрасли двухфазные расходомеры находят своё применение для получения детальной информации о процессе заполнения ракет криогенным топливом и окислителем как на космодроме, так и в открытом космосе. В газовой промышленности необходимо контролировать процесс заполнения/опорожнения танкера сжиженным газом.

Одним из основных требований, предъявляемых к двухфазным криогенным расходомерам, является возможность бессепарационного измерения паросодержания и расхода криоагента. Это связано с тем, что криоагент может постепенно испаряться и с течением времени однофазный поток становится двухфазным. С этим требованием тесно связана задача бессепарационного определения расхода и соотношения компонент в потоках нефть-газ-вода, с которыми имеют дело в нефтегазовой промышленности. При создании бессепарационных расходомеров для нефтегазовой отрасли разумно использовать опыт, полученный при создании подобных устройств для криогенной отрасли.

Цели и задачи исследования

Целями диссертации является разработка полнодиапазонного гелиевого криогенного двухфазного расходомера на базе усовершенствованного диэлькометрического ВЧ-датчика паросодержания и сужающего устройства, удовлетворяющего техническому заданию для Нуклотрона; разработка расходомера для гомогенных потоков водорода, СПГ, азота и кислорода; исследование и применение развитых методов криогенной расходомерии для создания расходомеров для нефтедобывающей промышленности.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1. Численное моделирование усовершенствованной конструкции диэлькометрического ВЧ-датчика паросодержания, целью которой является определение оптимального типа обмотки, которая обеспечивает воспроизводимость показаний ВЧ-датчика и их независимость от структуры потока.
2. Обоснование упрощённой процедуры калибровки усовершенствованного ВЧ-датчика паросодержания и определение его метрологических характеристик.
3. Обоснование выбора СУ, как оптимального устройства для измерения расхода потоков двухфазного гелия, характерных для ускорителя Нуклотрон; расчет его калибровочной и метрологической характеристик.
4. Изучение преимуществ радиоактивного гамма-метода в сравнении с ВЧ-методом при создании двухфазных расходомеров для гомогенных потоков водорода, кислорода, азота и СПГ в трубах большого диаметра. Экспериментальное исследование

расходомера на основе гамма-плотномера и определение его метрологических характеристик.

5. Создание и определение калибровочных/метрологических характеристик двухфазных расходомеров для потоков нефть-соленая вода: на основе ВЧ-датчика и сужающего устройства и на базе гамма-плотномера и сужающего устройства. Изучение влияния температуры на точностные метрологические характеристики датчика.

Научная новизна работы

1. Впервые проведено численное моделирование металлокерамического ВЧ-датчика паросодержания круглого сечения имеющий лучшие вакуумостойкие характеристики по сравнению с предыдущими моделями. Найден новый тип обмотки меандровой линии для этого датчика улучшающий его точностные характеристики. Оценены калибровочные/метрологические характеристики датчика и их температурная зависимость. Предложена и обоснована упрощенная процедура калибровки датчика по минимальному набору реперных точек на статическом калибровочном стенде.

2. Предложен способ определения метрологических/калибровочных характеристик сужающего устройства для двухфазных потоков гелия основанный на адиабатическом приближении. Предложен способ измерения расхода двухфазного потока гелия, основанный на измерении разности температур.

3. Впервые создан ДР круглого сечения на основе металлокерамического ВЧ-датчика и СУ, который имеет малое гидравлическое сопротивление, высокую надежность и удовлетворяет требованиям технического задания на Нуклотрон. Данный расходомер может быть использован для мониторинга параметров потока двухфазного гелия, встречающихся при работе криогенной системы охлаждения сверхпроводящих магнитов бустерного синхротрона и коллайдерного кольца комплекса NICA.

4. Создан двухфазный расходомер для нефтедобывающей промышленности на базе ВЧ-датчика и СУ и предложен усовершенствованный алгоритм для определения характеристик потока. Создан и испытан первый расходомер для двухфазных потоков СПГ и смесей нефть-вода, удовлетворяющий требованиям ГОСТ [2].

Научная и практическая ценность работы определяется проблемно-тематическими планами ОИЯИ, в рамках которых она велась: тема № 02-1-1107-2011/2019 и тема № 07-1-1110-2012/2013. Предложенный расходомер для потоков двухфазного гелия может быть использован для мониторинга системы охлаждения строящегося ускорителя NICA. Двухфазный расходомер для СПГ может быть использован для контроля добычи, сжижения и поставки природного газа в рамках проекта Ямал-СПГ.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод расчета расхода криогенных потоков с использованием сужающего устройства и результаты применения данного метода для создания двухфазного гелиевого расходомера для систем охлаждения ускорителей.
2. Результаты численного моделирования для определения нового типа намотки меандровой линии.
3. Исследование упрощенной процедуры калибровки модернизированного ВЧ-датчика и его калибровочных/метрологических характеристик.
4. Результаты исследования по определению калибровочных/метрологических характеристик двухфазного расходомера на базе гамма-плотномера и сужающего устройства для СПГ и водонефтяных потоков.
5. Результаты исследования по определению калибровочных/метрологических характеристик двухфазного расходомера на базе ВЧ-датчика и СУ и усовершенствованного алгоритма определения характеристик потока.

Апробация работы

Основные результаты докладывались на международной метрологической конференции «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов» (Казань, Россия, 2013), на 3-ей международной конференции по достижениям в области датчиков и электронных приборов (Москва, Россия, 2017) и 12-ой международной конференции по теплообмену, механике жидкости и термодинамике (Коста-дель-Соль, Испания, 2016).

Личный вклад автора.

Автор предложил новый метод расчета расхода потоков двухфазных криоагентов с помощью сужающего устройства и применил его для определения калибровочных/метрологических характеристик расходомера для двухфазных потоков гелия характерных для ускорителя Нуклотрона. Автор выполнил численное моделирование ВЧ-датчика, которое позволило определить оптимальный тип намотки меандровой линии. Автор участвовал в разработке, отладке, тестировании, калибровке и испытании двухфазных расходомеров для криогеники и нефтедобычи, а также в разработке программного обеспечения для работы с ними. Все экспериментальные данные, полученные на испытательных стендах, обрабатывались, анализировались и подготавливались к публикации лично автором. Вся работа, от постановки задачи до получения окончательных результатов, выполнялась либо автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии совместно с соавторами опубликованных работ.

Внедрение результатов работы

Расходомер на базе ВЧ-датчика и сужающего устройства применяется в индийском космическом центре (LPSC) в городе Тривандрум, поставленный в рамках договора о сотрудничестве между ОИЯИ и LPSC.

Публикации.

Результаты диссертации опубликованы в 7 научных работах в российских и зарубежных изданиях, в том числе 6 статей в журналах из списка ВАК «Измерительная техника», «Cryogenics», «Flow Measurement and Instrumentation», «International Journal of Multiphase Flow», «Particles and Nuclei, Letters», а также в трудах и сборниках докладов международных и российских научных конференций.

Структура и объём работы

Диссертация включает введение, семь глав, выводы, список используемой литературы (129 источников). Полный объём диссертации – 183 страницы, 58 рисунков, 13 таблиц, 1 приложение.

Краткое содержание работы

Во **введении** рассмотрена актуальность исследуемой темы, обозначена цель диссертации и сформулированы решаемые задачи, научная новизна и научно-практическая ценность работы. Перечислены научные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, а также излагается краткое содержание работы.

В **первой главе** определяются основные величины, а также вводятся термины и определения, используемые для описания двухфазных потоков. Формулируются технические требования, которым должен удовлетворять двухфазный криогенный расходомер для гелиевых потоков в соответствии с техническим заданием для сверхпроводящего ускорителя многозарядных ионов Нуклотрон. Работа расходомера должна описываться простой физической моделью, он должен работать в полном диапазоне по паросодержанию, иметь малое гидравлическое сопротивление (< 0.1 бар), не иметь подвижных частей, обладать достаточно простыми калибровочными кривыми и хорошими метрологическими характеристиками. Регламентируется его использование для определения расхода потоков вплоть до 67 г/с. Делается обзор существующих устройств и методов по измерению паросодержания и расхода криогенных потоков, описанных в научной литературе, патентах, а также представленных на коммерческом рынке. На основе сформированных технических требований из всего рассмотренного множества устройств для измерения паросодержания и расхода отбираются те из них, которые удовлетворяют перечисленным требованиям. В качестве устройства для измерения расхода было выбрано сужающее устройство, так как оно удовлетворяет необходимым техническим требованиям: имеет малое гидравлическое сопротивление, может работать во всем диапазоне паросодержаний, а его работа описывается достаточно простыми зависимостями, следующими из ясных физических принципов работы устройства. Два альтернативных устройства для измерения паросодержания удовлетворяют заявленным техническим требованиям: ВЧ-датчик с меандровой линией круглого сечения и гамма-плотномер. Оба имеют достаточно простую процедуру калибровки и хорошие метрологические характеристики. ВЧ-датчик более подходит для труб небольшого диаметра (не более 100 мм), а гамма-плотномер для труб более крупного калибра.

Вторая глава посвящена двухфазным расходомерам для гелия с каналом круглого поперечного сечения на базу ВЧ-датчика и сужающего устройства.

В п. 2.1 излагается принцип действия двухфазного расходомера. Критикуется изложенный в работе [Filipov, 2011] метод расчета расхода двухфазного гелия с помощью калибровочной функции на основе измерения перепада давления на сужающем устройстве. Показывается, что не совсем корректные физические предположения, которые лежат в основе предлагаемого метода приводят к тому, понятие калибровочной функции $k(\varphi, G)$, связывающее перепад давления на сужающем устройстве и расход в соотношении:

$$G = k(\varphi, G) \xi \sqrt{\Delta P \rho(\varphi)} \quad (1)$$

теряет смысл при достаточно больших расходах. Вместо этого предлагается рассчитывать расход с учетом эволюции параметров потока в адиабатическом приближении без учета потерь на трение. Вместо соотношения (1) в работе [Архаров, 2020] получено следующее соотношение, описывающее работу сужающего устройства:

$$G = \sqrt{\frac{2(I_1 - I_2)}{A_2^2 \left(\frac{x_2^3}{\rho_{g2}^2 \varphi_2^2} + \frac{(1-x_2)^3}{\rho_{l2}^2 (1-\varphi_2)^2} \right) - A_1^2 \left(\frac{x_1^3}{\rho_{g1}^2 \varphi_1^2} + \frac{(1-x_1)^3}{\rho_{l1}^2 (1-\varphi_1)^2} \right)}}. \quad (2)$$

На рисунке 1 показано сравнение этих двух расчетов.

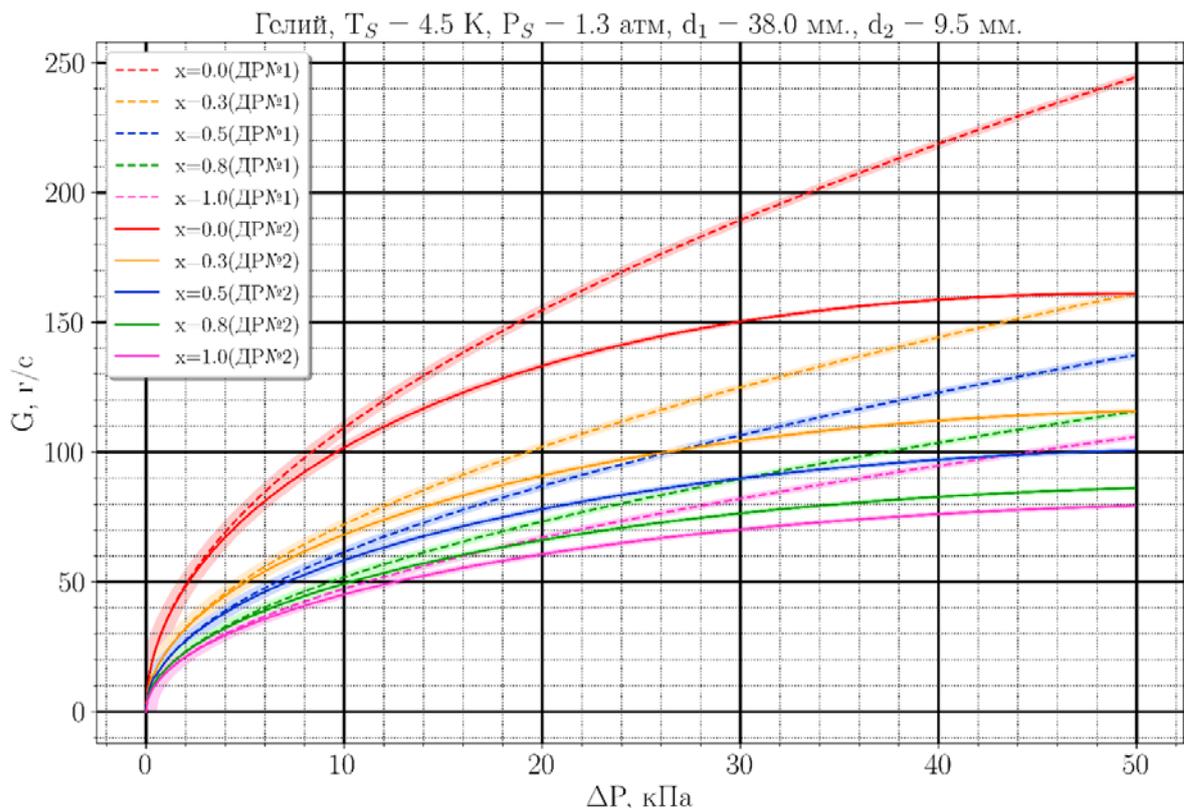


Рисунок 1. Зависимость расхода потока двухфазного гелия от перепада давления на СУ при различных массовых долях. Представлены два вида кривых, сплошные – рассчитаны по изложенному в данной работе способу, пунктирные – рассчитаны по способу, представленному в работе

[Filiprov, 2011]. Широкие фоновые полосы показывают предельные отклонения значений расхода, обусловленные погрешностью измерения датчика давления с классом точности 1.0 и абсолютной погрешностью температуры в широкой части СУ 10 мК.

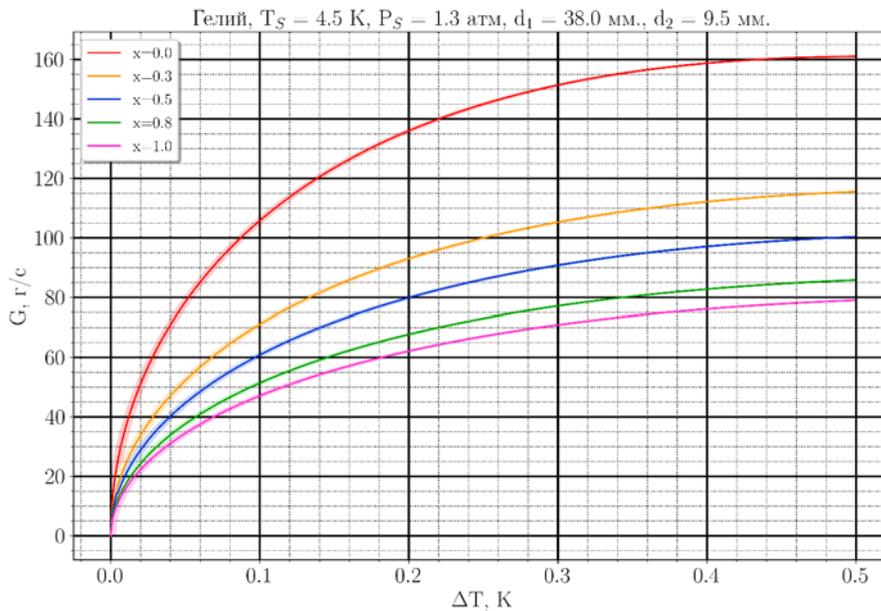


Рисунок 2. Зависимость расхода потока двухфазного гелия от перепада температур между широкой и узкой частями СУ при разных массовых долях. Широкие фоновые полосы показывают предельные отклонения значений расхода, обусловленные погрешностью измерения температуры 1 мК.

На основе соотношения (2) предложен итерационный алгоритм, который позволяет непрерывно определять расход каждой компоненты двухфазного потока гелия по показаниям двух датчиков давления. Кроме того, было продемонстрировано, что расход можно определять, измеряя разность температур между широкой и узкой частью сужающего устройства (рисунок 2). На рисунке 3 сравниваются относительные ошибки расхода, измеренного по перепаду давления и разности температур в широкой и узкой части СУ.

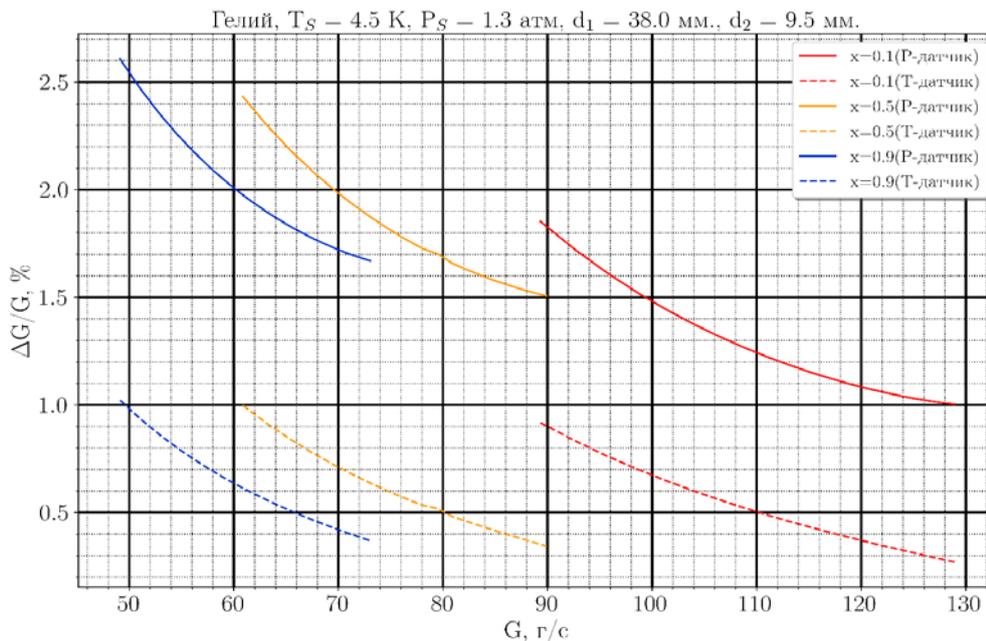


Рисунок 3. Относительная погрешность $\Delta G/G$, возникающая при определении массового расхода G при различных значениях массового паросодержания x , двухфазного гелия. Графики построены для рабочего диапазона ДР№2 11 – 30 кПа.

В п. 2.2 излагается принцип работы новой модификации металлокерамического ВЧ-датчика на основе меандровой линии для определения паросодержания. Он заключается в том, что в меандровой линии возбуждаются высокочастотные

колебания и зная резонансную частоту паросодержание можно определить по формуле:

$$\varphi = \frac{\varepsilon_l + \frac{k_3 - k_1 f^2}{1 - k_2 f^2}}{\varepsilon_l - \varepsilon_g} . \quad (3)$$

Проведенные эксперименты показывают, что металлокерамический датчик является более вакуумостойким по сравнению с предыдущими моделями, так как его показания были стабильны и не изменялись в течении 72 часов, пока проводились измерения. Важной характеристикой ВЧ-датчика является слабая зависимость его показаний от структуры протекающего потока, так как вещество в потоках с одинаковым паросодержанием может быть распределено совершенно произвольным образом и показания датчика, помимо прочего, могут зависеть также от данного распределения. Поэтому очень важной является решение задачи определения оптимального типа намотки меандровой линии, при которой показания датчика наименее чувствительны к структуре потока в нем. Этого можно достигнуть, создав в чувствительном объеме датчика однородное поле [Викторов, 1978]. Для этого было выполнено численное моделирование датчика и электромагнитных процессов, протекающих в нем. Изучались разные виды намоток, которые можно свести к трем типам: «равномерной», «редкой» и «густой». Под густой намоткой подразумевается такая намотка, плотность витков которой возле портов возбуждения наибольшая и постепенно снижается к периферии, с редкой намоткой дело обстоит ровно наоборот. Результаты численного моделирования представлены на рисунке 4, из которого следует, что редкая намотка является оптимальной.

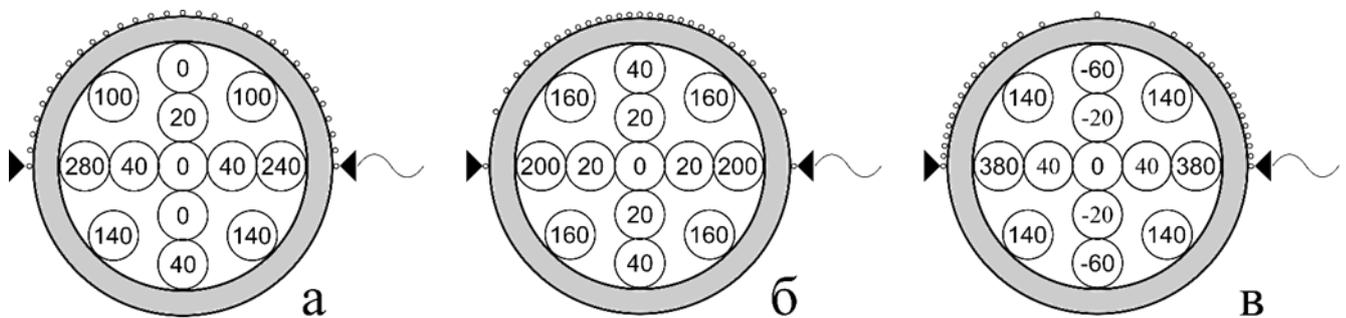


Рисунок 4. Результаты численного моделирования для различных типов намотки меандровой линии: (а) равномерная, (б) редкая и (в) густая. Числа в кружках равны разности резонансных частот датчика между положением возмущающего пробника в центре и в указанной позиции.

В п. 2.3 представлена универсальная методика калибровки ВЧ-датчика на основе меандровой линии. Кроме того, в этой части делается оценка метрологических характеристик датчика. Как видно из соотношения (3) калибровочная зависимость меандрового датчика содержит 3 коэффициента, которые необходимо определить при калибровке. Чтобы провести калибровку нужно измерить частоту в зависимости от диэлектрической проницаемости криоагента. Для этого можно было бы использовать, например, три различных криоагента с разными диэлектрическими проницаемостями. Однако коэффициенты, помимо прочего, зависят

от температуры, поэтому необходимо использование трех криоагентов с разными теплофизическими свойствами не приемлемо. Проблему можно было бы решить, используя один и тот же криоагент на линии насыщения, но имеющим разные значения паросодержания, например, 0 %, 100 % и какое-то третье, промежуточное значение. Но поддержание стабильного значения паросодержания криоагента, находящегося на линии насыщения представляет собой отдельную проблему, поэтому в качестве третьей реперной точки целесообразно выбрать вакуум, который довольно легко создать в объеме датчика. Определив калибровочные коэффициенты k_1, k_2, k_3 для какого-то криоагента при некоторой фиксированной температуре возникает вопрос, надо ли их определять значения этих трех коэффициентов для других рабочих температур. В работе показывается, что этого делать не обязательно, если измерить зависимость частоты датчика от температуры, когда в нем создан вакуум, получив таким образом так называемую «вакуумную кривую»:

$$f^* = f - k_4(T_S - T_0) - k_5(T_S - T_0)^2. \quad (4)$$

Зная эту зависимость всегда можно определить, такую приведенную частоту, f^* , используя значение которой в зависимости (3) можно определить корректное значение паросодержания, в независимости от того, при какой температуре измерена частота ВЧ-датчика, f (см. рисунок 5).

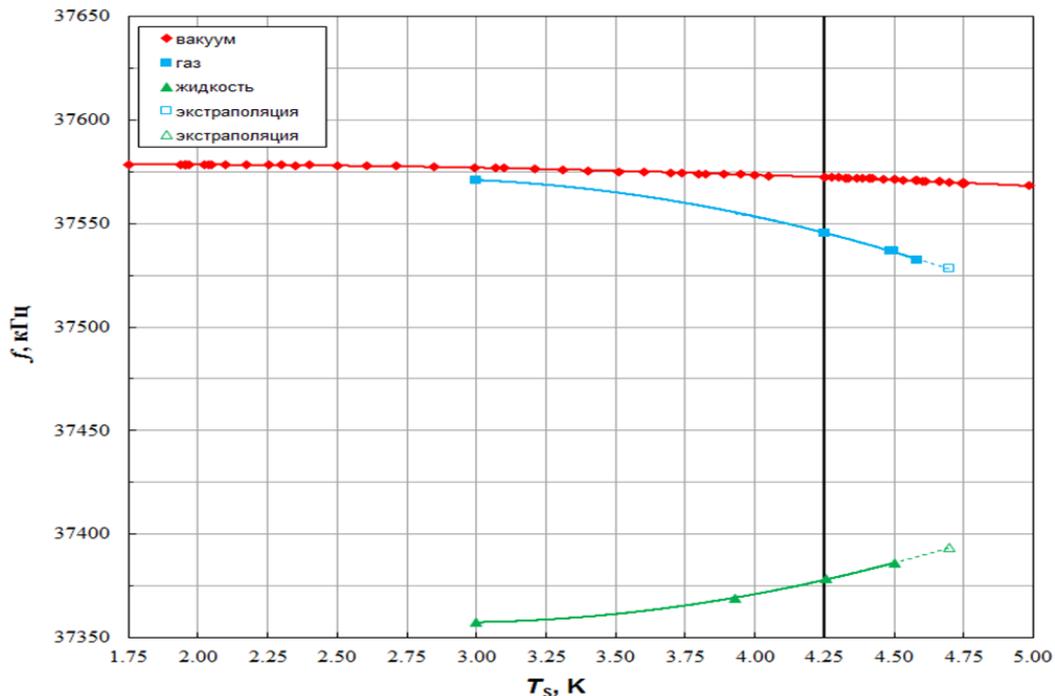


Рисунок 5. Резонансная частота, f , в зависимости от температуры насыщения, T_S .

Другой важной задачей является установление того, как ошибка паросодержания зависит от погрешности измерения частоты и температуры. Это позволяет оптимальным образом выбрать подходящие устройства для их измерения, которые с одной стороны позволяют определить паросодержание с заданной точностью, а с другой стороны не сильно увеличивая стоимость паромера при использовании чрезмерно прецизионных измерительных устройств. Ошибка паросодержания

определяется из зависимости диэлектрической проницаемости от калибровочных величин, параметров вакуумной кривой и температуры потока:

$$\varepsilon = \varepsilon(\varepsilon_1, \varepsilon_g, \varepsilon_v, f_l, f_g, f_v, f, T_s, T_0, k_4, k_5). \quad (5)$$

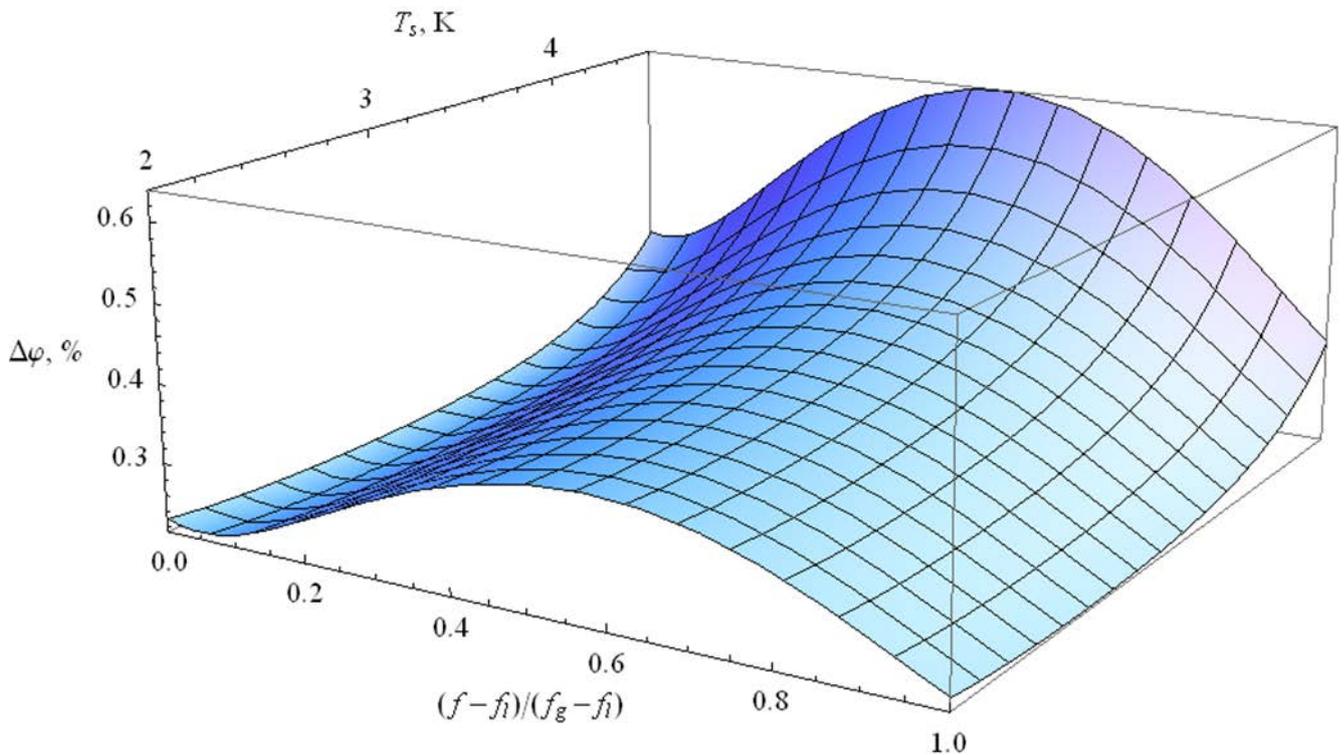


Рисунок 6. Ошибка паросодержания, $\Delta\varphi$, в зависимости от безразмерной резонансной частоты, $(f - f_i)/(f_g - f_i)$ и температуры насыщения, T_s .

На рисунке 6 показана зависимость ошибки определения паросодержания от безразмерной частоты и температуры при погрешностях измерения частоты ± 250 Гц и температуры ± 5 мК.

Сравнения экспериментально измеренных частот с рассчитанными по формуле (3) показывают, что они отличаются не более, чем на величину ошибки, представленной на рисунке 6. Пример такого сравнения для нескольких модификаций датчика и нескольких видов исследуемого криоагента показан на рисунке 7. Представленные сравнения показывают состоятельность предложенного способа калибровки.

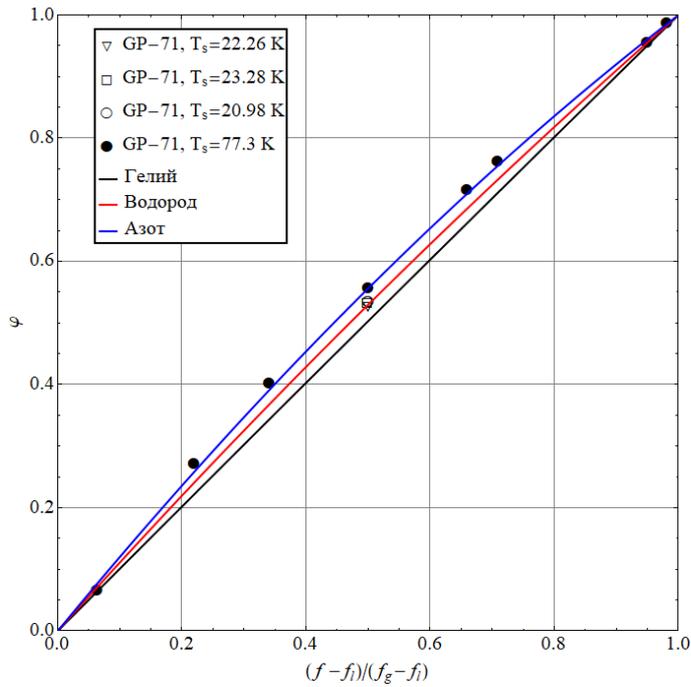


Рисунок 7. Зависимость паросодержания, φ , от безразмерной резонансной частоты, $(f - f_i)/(f_g - f_i)$ для гелия, водорода и азота.

Третья глава посвящена двухфазным расходомерам для гомогенных потоков водорода, СПГ, азота и кислорода. В качестве устройства для измерения паросодержания в нем вместо ВЧ-датчика используется гамма-плотномер на базе БГИ-45А с радиоактивным изотопом ^{137}Cs имеющим активность 0.31 ГБк и гамма-детектором Бертольд, который имеет преимущества при измерении расхода в трубопроводах с относительно большим диаметром (более 100 мм), так как изготовление металлокерамического датчика такого большого диаметра встречает некоторые трудности. Изучается зависимость относительной ошибки определения расхода в зависимости от паросодержания.

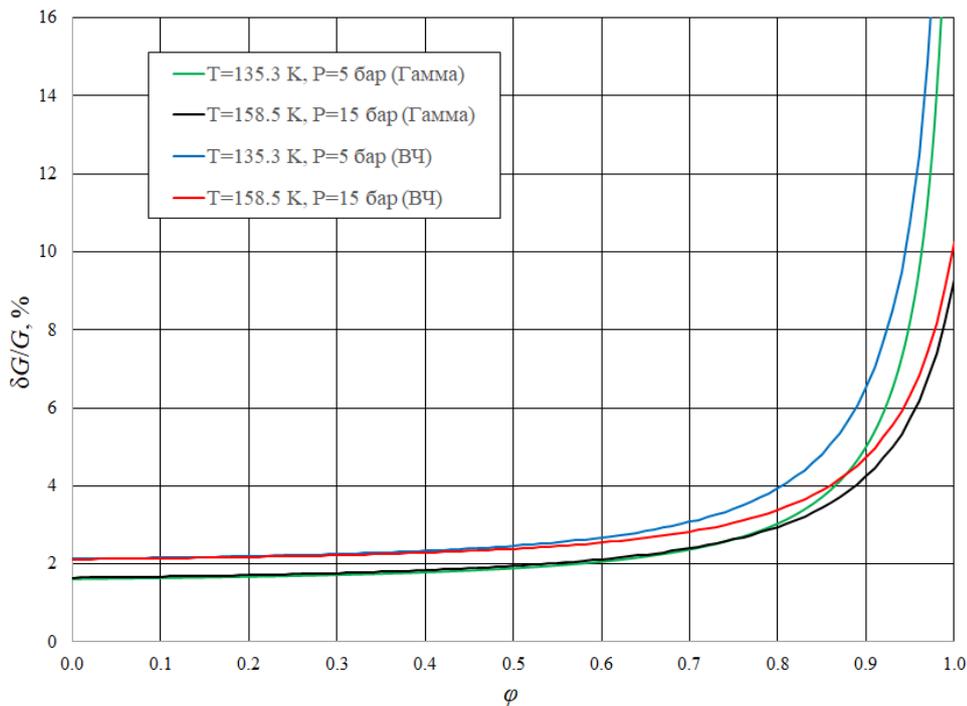


Рисунок 8. Зависимость относительной погрешности расхода $\delta G/G$ от паросодержания φ для гомогенных двухфазных потоков метана при давлениях насыщения 5 бар и 15 бар определенных ВЧ- и гамма-методом.

На рисунке 8 представлено сравнение относительных ошибок определения расхода измеренных с помощью гамма-метода и ВЧ-метода при различных значениях паросодержания. Поэтому предлагаемый расходомер на базе ГП может обеспечивать аналогичные и даже немного лучшие метрологические характеристики, чем расходомер на базе ВЧ-датчика. Для оценки метрологических характеристик расходомера он был испытан на государственном первичном специальном эталоне единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011 для имитации потоков СПГ потоками смесей эксоло и сжатого воздуха.

Рисунок 9, на котором показана типичная структура потока, демонстрирует, что всем потокам жидкость-газ присущи значительные колебания параметров потока – перепада давления, паросодержания и плотности. Поэтому все измеряемые сигналы усреднялись соответствующим способом. После усреднения зависимости всех сигналов от времени становятся практически стабильными при одинаковых массовых расходах и значениях газового объемного содержания. Тесты показали, что интервала в 10 – 15 с достаточно для такого усреднения.



Рисунок 9. Структура горизонтального потока смеси эксоло и воздуха при давлении 5 бар, расход эксоло составляет 9.35 кг/с, а газовое объемное содержание 41.36 %.

Результаты испытаний расходомера представлены на рисунке 10. Видно, что все экспериментальные точки с расходами жидкости 11.33 кг/с и 13.32 кг/с имеют относительные ошибки, которые не превышают 2 %. Однако при более низких расходах эксоло, соответствующие ошибки увеличиваются и превышают 2 % для 3 из 7 точек при расходе 9.34 кг/с, а одна точка имеет отклонение 5 %. Это можно объяснить тем обстоятельством, что горизонтальные двухфазные потоки эксоло и сжатого воздуха становятся ближе к расслоенным даже при довольно высоком значении объемного газосодержания 41.36 %.

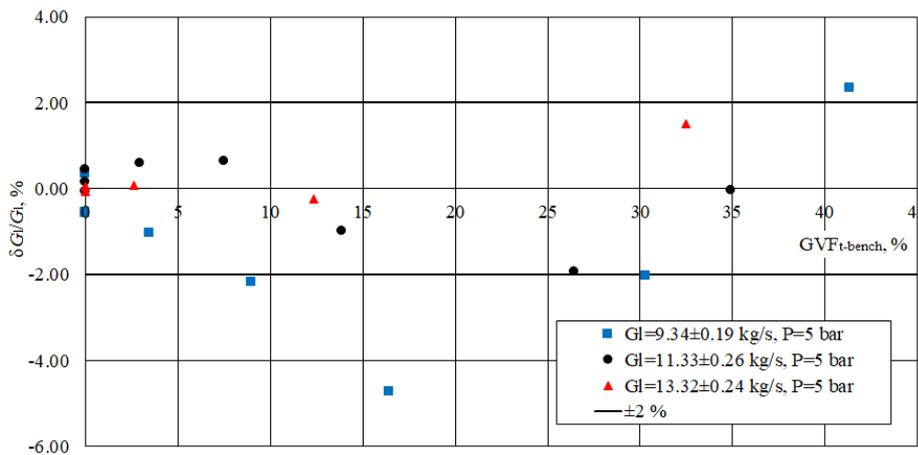


Рисунок 10. Относительные погрешности массовых расходов потоков экс-ола и сжатого воздуха в зависимости от газового объемного фактора, задаваемого стендом.

Далее делаются **выводы** по первой части:

1. Благодаря специальной намотке в чувствительном объеме датчика создается практически однородное электромагнитное поле, вследствие чего показания датчика слабо зависят от структуры потока.
2. Новая модификация датчика обеспечивает долгосрочную стабильность показаний, имеет высокую прочность конструкции, вдвое более высокую добротность по сравнению с предыдущими модификациями и отличные метрологические характеристики – величина ошибки паросодержания не превышает $\pm 1 \%$ для гелия и водорода. Для датчиков данного типа предложена упрощенная процедура калибровки, а калибровочные кривые – зависимости паросодержания от безразмерной частоты имеют общий характер, не зависящий от материала датчика и его рабочего температурного диапазона.
3. Для описания работы сужающего устройства был предложен способ отличный от изложенного в работе [Filiprov, 2011] для потоков двухфазного гелия, характерных для сверхпроводящего ускорителя многозарядных ионов Нуклотрон. Изложенный способ позволяет уменьшить ошибку определения расхода, а также предлагает новую методику определения расхода по измерению разности температур между разными частями сужающего устройства.
4. На базе металлокерамического ВЧ-датчика паросодержания и сужающего устройства впервые был создан двухфазный расходомер круглого сечения для гелиевых потоков описываемый простой физической моделью, работающий в полном диапазоне по паросодержанию с малым гидравлическим сопротивлением (< 0.1 бар), без подвижных частей, имеющий достаточно простые калибровочные кривые и хорошие метрологические характеристики.
5. На базе гамма-плотномера и сужающего устройства создана другая модификация двухфазного расходомера для работы с однородными потоками СПГ, водорода, азота и кислорода в трубах относительно большого диаметра (> 100 мм). В рабочей области относительная ошибка определения массового расхода не превышает

3 %. Модельные эксперименты подтвердили применимость предлагаемой системы для квазигомогенных потоков, при расходах жидкой фазы, превышающей 11 кг/с относительные погрешности определения массового расхода этой фазы, не превышает 2 %, причем для реальных потоков СПГ метрологические характеристики будут еще лучше.

6. Двухфазный расходомер на базе ВЧ-датчика и сужающего может быть использован в охлаждающей системе строящегося сверхпроводящего ускорителя NICA, системах заправки ракет жидким топливом, в настоящее время он используется индийским космическим центром (LPSC). Двухфазный расходомер на базе гамма-плотногомера и сужающего устройства может быть использован в газодобывающей промышленности для контроля процесса заправки танкеров, перевозящих СПГ, например, в проекте Ямал-СПГ.

В четвертой главе в дополнении к величинам характерным для двухфазных потоков определяются две основные величин, используемые для описания трехфазных потоков. Определяются технические требования, которым должен удовлетворять многофазный расходомер для газоводонефтянных потоков в соответствии с ГОСТ [2]. Указываются проблемы, которые характерны для сепарационных систем определения расхода. Формулируется основная задача, решению которой посвящена вторая часть диссертации – создать бессепарационный двухфазный расходомер для измерений расхода нефти и пластовой воды с относительно небольшим общим гидравлическим сопротивлением (меньше 50 кПа) и временем измерения порядка 1 с, который бы удовлетворяет требованиям ГОСТ [2] и на его базе обосновать возможность создания бессепарационного трехфазного расходомера на для потоков нефть-пластовая вода-газ. Указываются основные сложности, которые необходимо учитывать при работе с потоками, характерными для нефтегазодобывающей промышленности: вязкость, проводимость, сложная зависимость теплофизических свойств от температуры и сорта нефти. Делается обзор существующих многофазных бессепарационных расходомеров, описанных в научной литературе, патентах, а также представленных на коммерческом рынке. Основываясь на предыдущем опыте формулируются принципиальные сложности, возникающие при применении ВЧ-метода в нефтегазовой сфере, в частности, указывается, что его применимость ограничена довольно узким диапазоном по обводненности от 0 до 50 %. Далее на основе изучение литературы об уже существующих методах определения покомпонентного состава газоводонефтянных смесей выбирается гамма-метод в качестве альтернативы ВЧ-методу и который лишен присущих ВЧ-методу недостатков. Дается краткое введение в сущность гамма-метода, рассматриваются основные понятия и определения характерные для него, приводятся основные расчетные формулы для определения покомпонентного состава:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{01} \exp(-\mu_{g1}x_g - \mu_{o1}x_o - \mu_{w1}x_w) \\
 I_2 &= I_{02} \exp(-\mu_{g2}x_g - \mu_{o2}x_o - \mu_{w2}x_w) \\
 x_g + x_o + x_w &= d
 \end{aligned} \tag{6}$$

В зависимости от физических и геометрических свойств потока, а также расчета ошибок измерения, которые зависят от времени измерения и активностей используемых источников:

$$\begin{aligned}\delta\left(\frac{x_d}{d}\right) &= \sqrt{\frac{(\mu_{o2} - \mu_{w2})^2}{N_1^*} + \frac{(\mu_{o1} - \mu_{w1})^2}{N_2^*}} \frac{1}{dH\sqrt{t}} \\ \delta\left(\frac{x_o}{d}\right) &= \sqrt{\frac{(\mu_{w2} - \mu_{g2})^2}{N_1^*} + \frac{(\mu_{w1} - \mu_{g1})^2}{N_2^*}} \frac{1}{dH\sqrt{t}} \\ \delta\left(\frac{x_w}{d}\right) &= \sqrt{\frac{(\mu_{g2} - \mu_{o2})^2}{N_1^*} + \frac{(\mu_{g1} - \mu_{o1})^2}{N_2^*}} \frac{1}{dH\sqrt{t}},\end{aligned}\tag{7}$$

а также приводится графическое представление решения системы уравнений (6).

В пятой главе рассматриваются двухфазные расходомеры для потоков типа «нефть-пластовая вода» работа которых основана на применении ВЧ-метода. Описываются результаты испытаний двухфазного расходомера на полигоне TUV SUD NEL, использующего корреляционный метод для определения расхода потока по корреляции сигналов с двух ВЧ-датчиков, которые показывают непригодность данного метода, так как ошибка определения потока, которую данное устройство может обеспечить не удовлетворяет требованиям ГОСТ [2]. Данный результат находится в полном согласии с выводами [3], сделанными специалистами фирмы Шлюмберже, которая является одним из лидеров по производству беспарационных устройств для определения расходов для нефтегазовой промышленности. Кроме того, корреляционный метод не применим для определения расходов гомогенных смесей, так как в этом случае не удастся найти ярко выраженного максимума корреляционной функции. Поэтому было решено сосредоточить усилия на изучении работы двухфазных расходомеров на базе гамма-плотногомера и сужающего устройства (см. рис. 11).



Рисунок 11. Гамма плотномер, установленный на стальную трубу. На рисунке показаны БГИ-45А с радиоактивным источником ^{137}Cs 17 мКи (желтый), сцинтилляционный детектор с кристаллом NaI (LB-4441-01-0a-Gd-E) и процессорный блок (LB-444) соединенный с ноутбуком.

Конфигурация данного расходомера аналогична конфигурации применяемой в криогенном расходомере для потоков СПГ, но имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при работе с потоками смеси нефти с пластовой водой и которые кратко излагаются в диссертации согласно работе [5]. В этой же работе был предложен алгоритм определения расхода сырой нефти по показаниям с ВЧ-датчика и датчиков перепада давления на сужающем устройстве и датчикам абсолютного давления. Далее в работе приводится модифицированный алгоритм, который учитывает температурные эффекты, среди которых наиболее существенные:

1. Зависимость резонансной частоты от температуры ВЧ-датчика:

$$f^* = f - r(w)(T_b - T_o). \quad (8)$$

2. Зависимость вязкости водонефтяной смеси от температуры:

$$\mu_o(T_f) = \rho_o \left(10^{a(T_f)} - 0.6 \right), \quad a(T_f) = 10^{W(T_f)}. \quad (9)$$

Оказывается, что зависимостью плотности от температуры можно пренебречь, так как она дает поправки меньшего порядка по сравнению с вышеперечисленными. Новый алгоритм позволяет заметно уменьшить ошибки определения обводненности и расхода, а сами формы распределений ошибок становятся регулярными (см. рис.12 и 13).

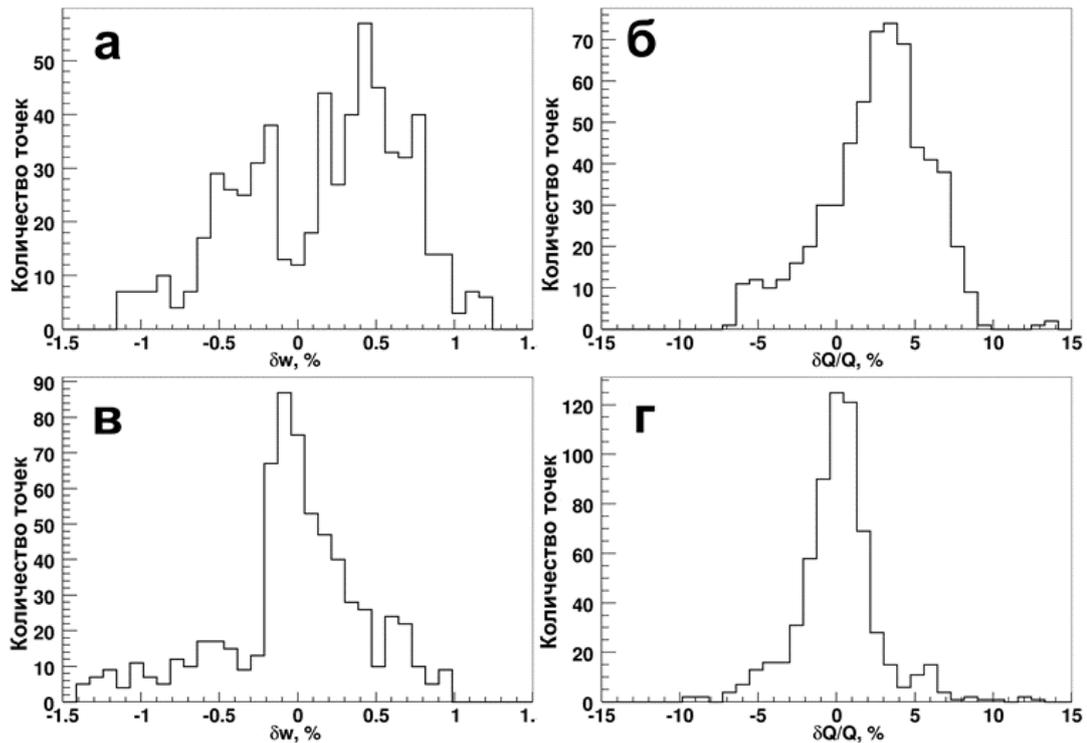


Рисунок 12. Сравнение результатов обработки первого набора данных ($\Delta T = 6-8 \text{ }^\circ\text{C}$) двумя алгоритмами: предыдущим [5] и представленном в диссертации: (а) δw -распределение, влияние температуры не учитывалась; (б) $\delta Q/Q$ -распределение, влияние температуры не учитывалась; (в) δw -распределение, влияние температуры учитывалось; (г) $\delta Q/Q$ -распределение, влияние температуры учитывалось.

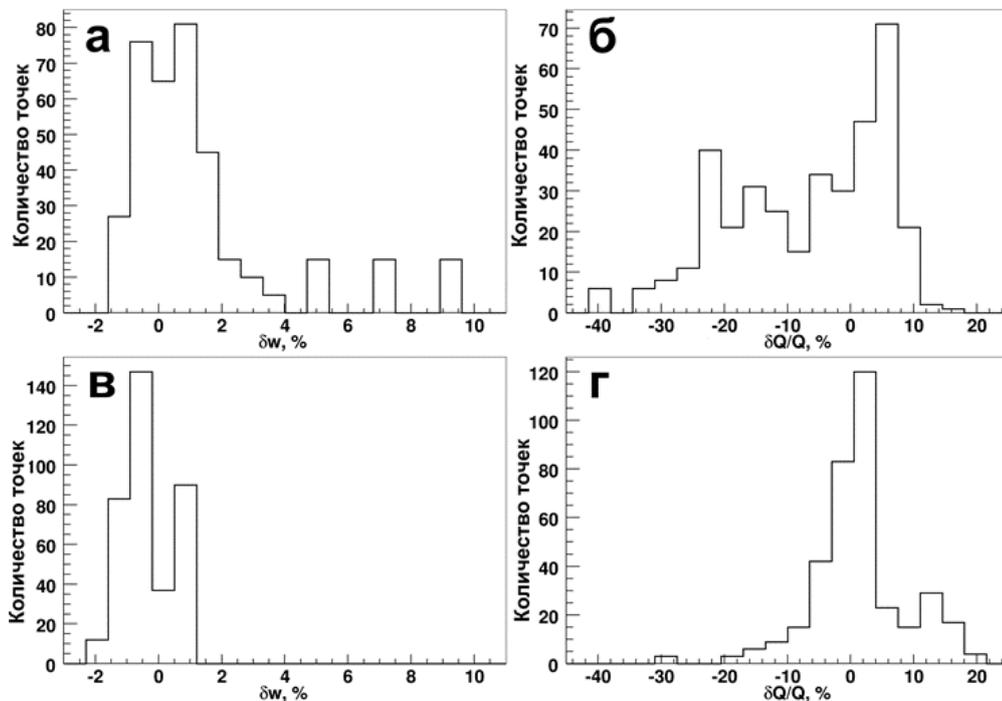


Рисунок 13. Сравнение, аналогичное представленному на рисунке 11, только для второго набора данных ($\Delta T = 24-30 \text{ }^\circ\text{C}$).

Глава шестая посвящена двухфазным расходомерам на базе гамма-плотнo-мера и сужающего устройства. Данный расходомер рассматривался в третьей

главе, и он может работать как с гомогенными потоками, так и во полном диапазоне обводненностей от 0 до 100 %. Излагается принцип работы расходомера и делается оценка активности источника, который бы обеспечивал заданную точность при заданном времени измерения в 1 с. Найденная активность источника оказывается равной 0.31 ГБк, что меньше максимально допустимой активности источника (0.836 ГБк), который может быть помещен в блоки типа БГИ-45А с ^{137}Cs согласно ГОСТ [2]. Далее изложена процедура калибровки гамма-плотногомера *in situ*. Приводится исследование гамма-плотногомера фирмы Бертольд по определению ослабления гамма-излучения в растворах поваренной соли в воде переменной солености, а также по определению плотности водных растворов NaCl, в диапазоне массовых концентраций соли $c = 0 - 26$ %. Результаты данных исследований показаны на рисунке 14. Из рисунка видно, что зависимость определенной плотности от концентрации раствора – линейная, а максимальная относительная погрешность определения плотности соленого раствора не превышает 1 %. Также в данной главе рассматриваются различные существующие на рынке устройства для определения обводненности. Показывается, что из всего разнообразия существующих изделий наиболее оптимальным оказывается устройство на базе гамма-плотногомера и сужающего устройства, так как оно является относительно недорогим, обладает небольшим гидравлическим сопротивлением, процедура его калибровки достаточно проста, так как зависимость расхода и обводненности от измеряемых величин описывается простыми зависимостями. Далее формулируются условия, которым должен удовлетворять испытательный стенд – он должен быть прокачным и обеспечивать потоки максимально близкие к тем, с которыми приходится иметь дело на реальных нефтяных скважинах. На основании этих условий обосновывается выбор испытательного стенда TUV SUD NEL, который может обеспечить потоки североморской нефти, соленой воды и газа требуемых расходов и соотношений. Компоненты поступают из резервуаров на смешение и подаются по горизонтальной магистрали длиной около 60 м к исследуемому прибору. После этого смешанный поток сепарируется. Таким образом не происходит взбивания водонефтяной эмульсии.

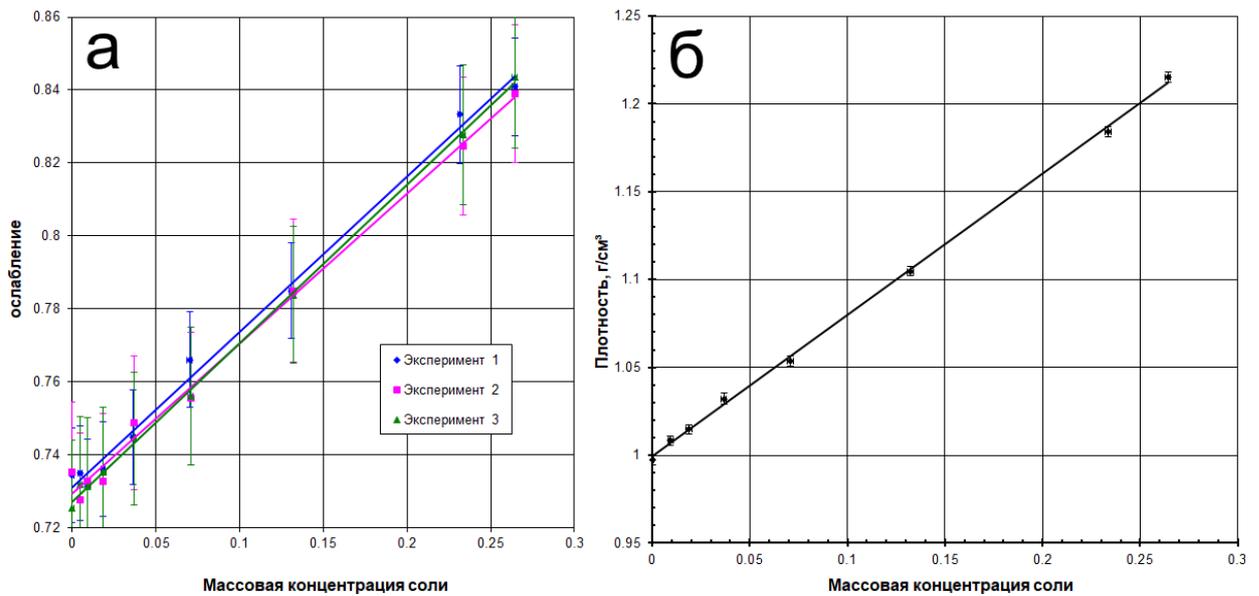


Рисунок 14. (а) Зависимость ослабления прошедшего излучения через раствор поваренной соли в зависимости от солёности раствора; представлены результаты трех независимых экспериментов. (б) Зависимость плотности соленого раствора, измеренной с помощью гамма-плотнмера, в зависимости от солёности.

Результаты испытания двухфазного расходомера на базе гамма-плотнмера и сужающего устройства представлены на рисунке 15.

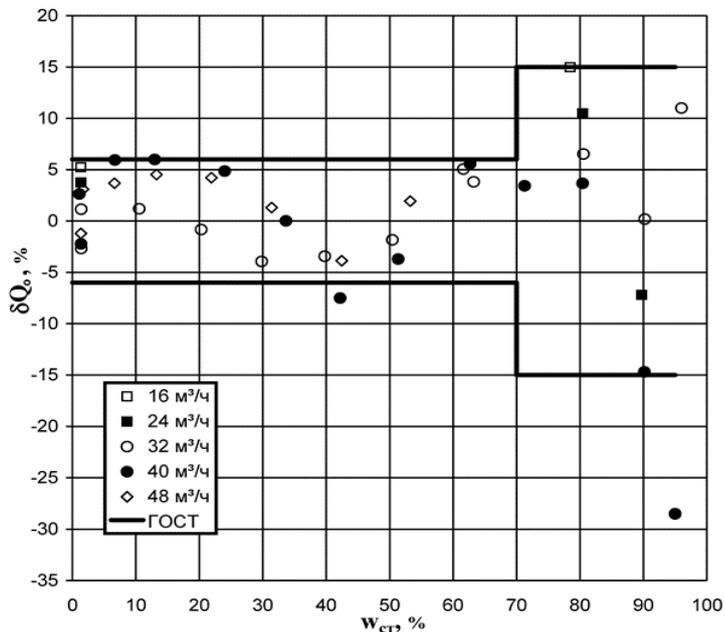


Рисунок 15. Зависимость относительной погрешности δQ_o определения объемного расхода сырой нефти без учета воды от истинной обводненности $w_{ст}$; линиями отмечены ее пределы, допустимые в соответствии с ГОСТ [3].

Видно, что 95 % экспериментальных точек (36 из 38) удовлетворяют требованиям ГОСТ [3]. Результаты испытаний также демонстрируют, почему был выбран именно стенд TUV SUD NEL. На рисунке 16 представлено сравнение прокачного и циркуляционного стенда. Видно, что перепад давления при одном и том же расходе выше на циркуляционном стенде из-за того, что нефть на нем взбивается и смесь приобретает более высокую вязкость.

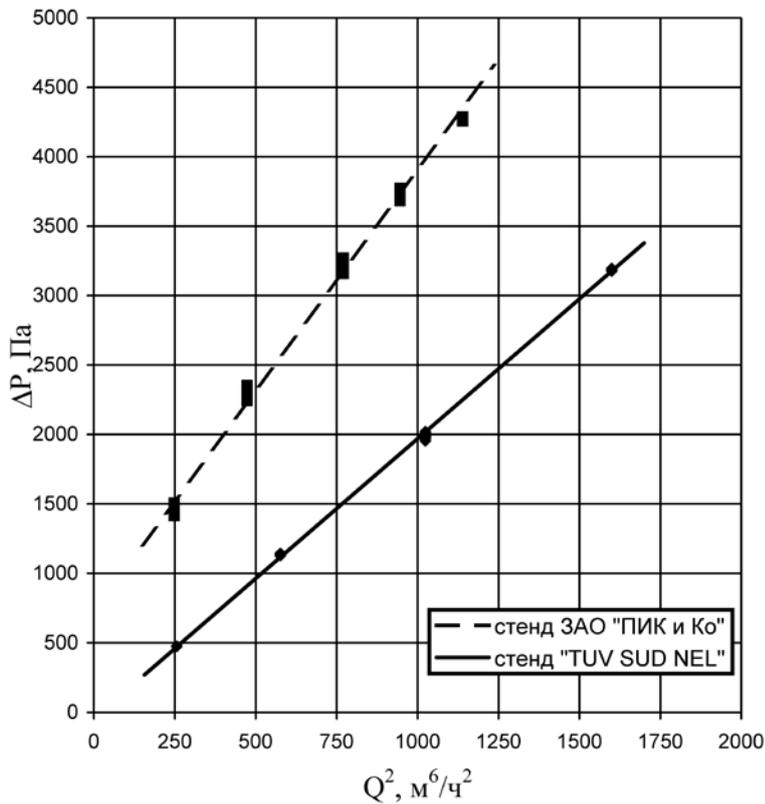


Рисунок 16. Перепад давления ΔP на сужающем устройстве в зависимости от квадрата расхода смеси нефть–пластовая (соленая) вода Q^2 при обводненности 50 % по данным для замкнутого циркуляционного стенда ЗАО «ПИК и Ко» и многофазного стенда TUV-NEL.

В седьмой главе обсуждается возможность создания бессепарационного трёхфазного расходомера «нефть-газ-пластовая вода», а также результаты испытания прототипа и пути его совершенствования. Так как результаты испытаний на циркуляционном стенде и на прокачном стенде показали, что невозможно использовать ВЧ-метод во всем диапазоне обводненностей, то от него было решено отказаться. Так как при испытаниях на полигоне TUV SUD NEL гамма-метод достаточно хорошо себя зарекомендовал, то было решено развивать расходомер в этом направлении (см. рис. 17 и 18).

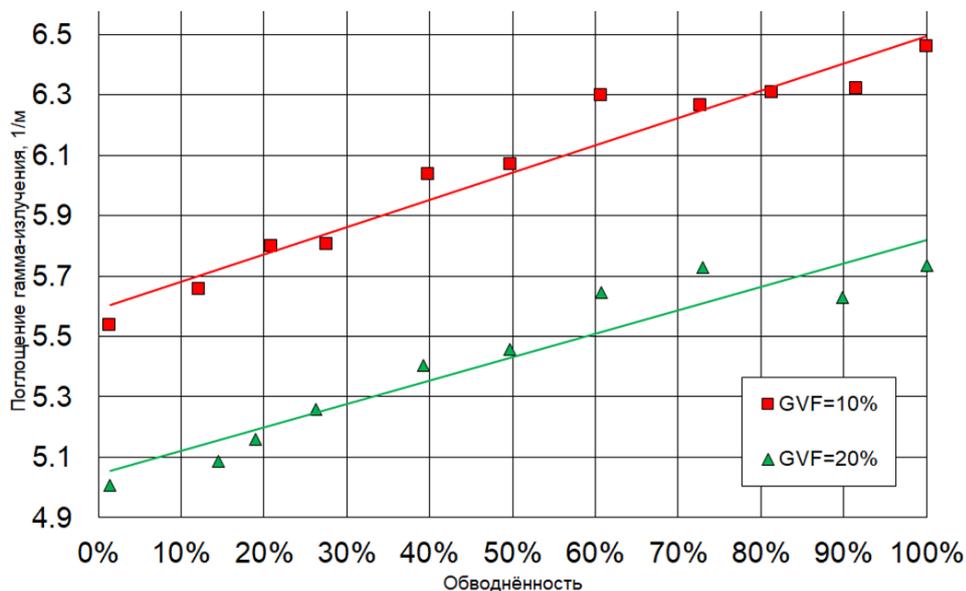


Рисунок 17. Зависимости сигнала с гамма-плотнoмера в зависимости обводнённости в экспериментах на полигоне TUV SUD NEL при различных газовых объёмных паросодержаний.

Чтобы обеспечить дополнительный сигнал, который зависит от характеристик потока, было решено использовать дополнительный гамма-источник ^{241}Am . Для одновременной работы с двумя гамма-источниками вместо детектора Berthold был заказан новый детектор гамма-излучения. Прототип трехфазного расходомера впервые был испытан на стенде ВГУП ВНИИР в экспериментах с потоками эксол-сжатый воздух-пресная вода. Из-за не совсем корректной настройки гамма-детектора, а также из-за того, что стенд не обеспечивал поддержания постоянной температуры потока, зависимости измеряемых сигналов от характеристик потока получились неоднозначными. Если исключить проблемные точки, то зависимости приобретают более ожидаемый вид (см. рис. 19).

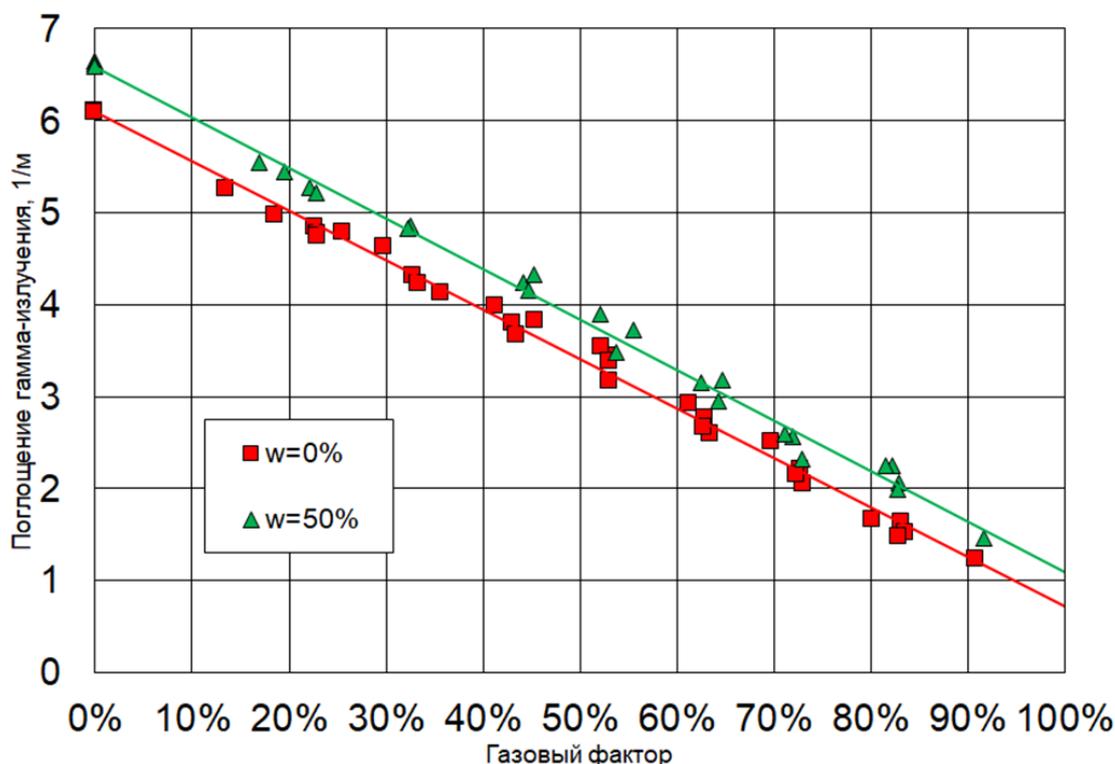


Рисунок 18. Зависимости сигнала с гамма-плотномера в зависимости от газового фактора при различных обводненностях в экспериментах на полигоне TUV SUD NEL.

Аналогичные зависимости от газового фактора имеют менее регулярную форму, что объясняется указанными проблемами со стендом и детектором.

Таким образом Для доработки бессепарационного трехфазного расходомера в перспективе необходимо решить следующие задачи:

1. описать работу СУ для трехфазных потоков и определить наиболее подходящий способ осреднения сигналов от датчиков перепада давления;
2. описать работу спектрометрического гамма-детектора и определить подходящий способ осреднения измеренных поглощений гамма-излучения;
3. разработать алгоритм обработки сигналов с гамма-детектора и СУ;
4. определить коэффициент скольжения газа относительно жидкой фазы во время испытаний на многофазном полигоне, так как коэффициент скольжения

сложным образом зависит от доли газа, отношения плотностей жидкости и газа и вязкости жидкости;

5. определить связь хордовых объемных величин с истинными в зависимости от структуры потока, которая в свою очередь зависит от скорости компонент и их физических свойств.

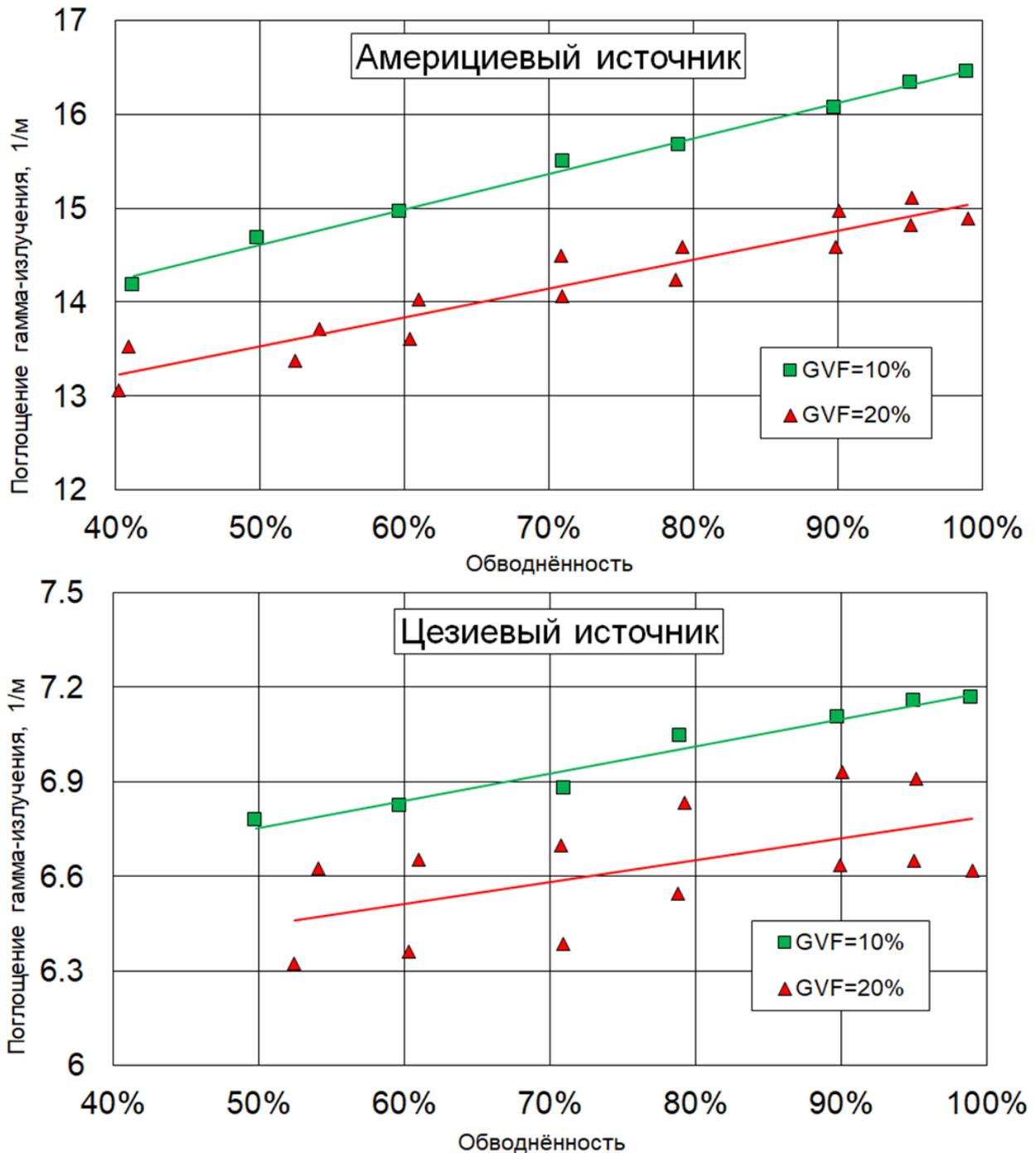


Рисунок 19. Зависимости поглощения гамма-излучения америциевого и цезиевого радиоисточников от обводнённости в экспериментах на полигоне ВГУП ВНИИР с потоками смесей эсола, газа и пресной воды.

Доработанный БТР мог бы служить в качестве импортозамещения расходомера Vx-Phasewatcher компании Шлюмберже, но со сроком службы превышающим в 3 раза срок службы Vx-Phasewatcher.

Затем следуют **выводы** по второй части диссертации:

1. Эксперименты показали, что использование корреляционного метода на основе двух ВЧ-датчиков для определения расхода не всегда работает и приводит к слишком большим ошибкам.
2. Для двухфазного расходомера на базе ВЧ-датчика и сужающего устройства предложен новый алгоритм, который учитывает температурные эффекты и позволяет уменьшить относительную ошибку определения расхода, а также сделать распределения ошибок более регулярными по сравнению с результатами работы алгоритма, который не учитывает температурных зависимостей. Данный расходомер может работать в ограниченном диапазоне обводненностей для потоков нефть-пластовая вода, и в полном диапазоне для потоков нефть-пресная вода и СПГ.
3. На базе гамма-плотномера и сужающего устройства создан двухфазный расходомер, который удовлетворяет требования ГОСТ [3]. Испытания данной модели расходомера показали, что предпочтительнее использовать прокачной стенд, который может обеспечивать работу с потоками реальной нефти для тестирования опытных образцов расходомеров, так как такие стенды, в отличие от циркуляционных не взбивают нефть. Последний эффект ведет к увеличению вязкости водонефтяных потоков.
4. Эксперименты на полигоне TUV SUD NEL с потоками североморской нефти, пластовой воды и газа показали, что гамма-плотномер реагирует линейным образом на изменение обводненности и газосодержания. Поэтому было решено модифицировать существующую модель двухфазного расходомера до трехфазного используя в дополнении к ^{137}Cs еще один радиоактивный источник ^{241}Am , а вместо детектора фирмы Berthold гамма-детектор фирмы ИФТП, который позволяет измерять интенсивности гамма-излучения сразу от двух источников.
5. Из-за того, что гамма-детектор ИФТП не был настроен должным образом, а также из-за того, что стенд ВГУП ВНИИР не обеспечивал постоянство температуры потока с помощью трехфазного прототипа в первом испытании невозможно было определить расход с регламентированными ГОСТ ошибками. Однако используя полученный опыт стало понятно каким образом улучшить гамма-детектор ИФТП и какие задачи необходимо решить для дальнейшего совершенствования бессепарационного трехфазного расходомера.

Основные публикации автора по теме диссертации:

1. Архаров И.А., Какорин И.Д. Методика расчёта расхода криогенных двухфазных потоков в бессепарационных расходомерах на базе сужающего устройства // Измерительная техника. 2020. N 7. С. 34-42.
2. Какорин И. Д., Филиппов Ю. П. Двухфазный расходомер на базе сужающего устройства и гамма-плотномера для смесей нефти и пластовой воды // Измерительная техника. 2013. N 11, С. 33-38.

3. Filippov Yu. P., Kakorin I. D. A method for calibrating cryogenic void fraction RF-sensors having around cross-section and estimating their accuracy // *Cryogenics*. 2016. V. 79. P. 63-73.
4. Filippov Yu. P., Kakorin I. D. Approach to monitor large two-phase LNG flows // *Flow Meas. Instrum.* 2016. V. 52. P. 163-169.
5. Filippov Yu. P., Kakorin I. D., Kovrizhnykh A. M. New solutions to produce a cryogenic void fraction sensor of round cross-section and its applications // *Cryogenics*. 2013. V. 57. P. 55-62.
6. Filippov Yu. P., Kakorin I. D., Panferov K. S. Influence of temperature on the algorithm to define salty water-in-oil flow characteristics // *Int. J. Multiphas. Flow*. 2014. V. 58. P. 52-56.
7. Monitoring of multiphase flows for superconducting accelerators and others applications / Filippov Yu. P. et al. // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2017. V. 14. P. 602-614.
8. Sensors, instrumentation and methods to monitor two- and three-phase flows: from cryogenics to oil production / Filippov Yu. P. et al. // *Sensors & Transducers Journal*. 2017. V. 217, P. 14-22.

Материалы конференций:

1. Филиппов Ю. П., Какорин И. Д., Коврижных А. М. Двухфазные и трёхфазные расходомеры для криогеники и нефтедобычи // *Материалы международной метрологической конференции «Актуальные вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкостей и газов»*, Казань, Россия, 2013. С. 24-26.
2. Filippov Yu. P., Kakorin I. D., Kovrizhnykh A. M. Sensors, instrumentation and methods for measurements in two- and three-phase flows occurring in oil and LNG production industry // *3rd International Conference on Sensors and Electronic Instrumentation Advances SEIA2017*, Moscow, Russia, 2017.
3. Monitoring of multiphase flows for different applications / Filippov Yu. P. et al. // *12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics ICHMT*, Costa del Sol, Spain, 2016.
4. Sensors, instrumentation and methods for measurements in two-phase cryogenic flows / Filippov Yu. P. et al. // *3rd International Conference on Sensors and Electronic Instrumentation Advances SEIA2017*, Moscow, Russia, 2017.

Цитируемая литература

1. Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. *Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин*. М.: Наука, 1978. 280 С.
2. ГОСТ 18324-73. Блоки источников ионизирующих излучений для релейных радиоизотопных приборов. Общие технические условия.
3. ГОСТ Р 8.615-2005. Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа: Общие метрологические и технические требования.
4. Эволюция измерений многофазных потоков и их влияние на управление эксплуатацией / Тоски Э. и др. // *Нефтегазовое обозрение*. 2003. Весна. С. 68-77.

5. Filippov Yu. P., Panferov K. S. Two-phase cryogenic flow meters. Part II – How to realize the two-phase pressure drop method // *Cryogenics*. 2011. V. 51. P. 640-645.
6. Filippov Yu. P., Panferov K. S. Diagnostics of salty water-in-oil two-phase flow // *Int. J. Multiphas. Flow*. 2012. V. 41. P. 36-43.