

На правах рукописи

Борзенков Павел Сергеевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ
РАСХОДОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОВЕРКИ РАСХОДОМЕРОВ-СЧЕТЧИКОВ
ГАЗА**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет» на кафедре космического приборостроения и систем связи

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Дрейзин Валерий Элезарович

Официальные оппоненты: **Мельников Владимир Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е.
Алексеева, профессор кафедры ядерных
реакторов и энергетических установок

Савельев Сергей Викторович,
кандидат технических наук, Научно-
исследовательский испытательный центр (г.
Курск) федерального государственного
унитарного предприятия «18 Центральный
научный исследовательский институт» МО
РФ, научный сотрудник

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Гамбовский государственный
технический университет»

Защита состоится «23» марта 2018 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.099.03, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, Белгородского государственного национального исследовательского университета по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета, а также на сайте: www.swsu.ru

Автореферат разослан «__» января 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н.



Милостная Наталья Анатольевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Трубопроводная транспортировка жидких сред и природного газа имеет исключительное значение для нашей страны. При этом одной из важнейших задач является измерение расхода транспортируемых сред. Точность показаний измерительной расходометрической аппаратуры определяют при испытаниях на специальных установках, которые называют испытательными расходомерными установками (ИРУ). Парк находящихся в эксплуатации счетчиков газа, особенно в секторе бытовых счетчиков, растёт в последние годы лавинообразно, а техническая база для проведения поверочных работ зачастую отстаёт от потребностей по производительности, удобству эксплуатации, достижимой точности. Основные технические решения по расходомерным установкам газа сложились ещё 30-40 лет назад и с тех пор развивались незначительно. Не стал исключением и наиболее массовый сектор бытовых счётчиков расхода газа, для большинства из которых поверочные работы ещё не начинались, т. к. их массовая установка в жилых домах и квартирах началась не так давно и межповерочные сроки в большинстве случаев ещё не вышли. При этом даже там, где сроки вышли, предпочитают заменять счётчики новыми, что объясняется дороговизной, низкой производительностью, слабой степенью автоматизации используемых ИРУ, пригодных для поверки бытовых счётчиков газа. Причём построение ИРУ по традиционным принципам не позволяет устранить их основные недостатки. В связи с этим разработка автоматизированной, пригодной для серийного производства, доступной и удобной в эксплуатации ИРУ для испытания и поверки бытовых счётчиков газа представляет научный интерес и практически важную задачу исследования.

Степень научной разработанности проблемы. Теоретическую базу исследования составляют труды ученых П.П. Кремлевского, В.Г. Цейтлина, В.Э. Дрейзина, В.П. Каргапольцева, Б.В. Бирюкова, А.И. Гордюхина, О.Г. Бобровникова, В.А. Кириллина, В.Н. Царькова, В.Г. Патрикеева, А.В. Лебедева, S. Parvizi, проводивших исследования в области расходометрии газа. В частности, теории расходометрии газа и жидкостей с использованием сужающих устройств посвящены работы П.П. Кремлевского, К.И. Цейтлина, В.А. Кириллина, А.Д. Альтшуля, П.Г. Киселева, С.Л. Арсеньева, И.Б. Лозовитского, Ю.П. Сирика. Практическими вопросами построения автоматизированных поверочных установок занимались В.П. Каргапольцев, А.В. Косолапов, А.А. Сиденко, О.А. Мицкевич, Г.Н. Бобровников, Б.М. Новожилов, и др. Определение требований к стабильности давления и расхода воздуха, отражено в работах Б.В. Бирюкова, М.А. Данилова, С.С. Кивилиса, А.В. Лебедева. Проблемы, связанные с небалансом в распределительных сетях и влиянием внешних факторов при учете потребления газа рассмотрены в работах А.И. Гордюхина, О.Г. Гущина, В.Н. Царькова, Б.М. Беляева, А.И. Верескова, В.Г. Патрикеева.

Целью диссертационного исследования является повышение производительности и технологичности процедуры поверки счетчиков и расходомеров газа.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены **следующие задачи:**

- на основе анализа типовых конструкций испытательных расходомерных установок газа определено перспективное направление исследований и требуемые метрологические и технико-экономические характеристики ИРУ, предназначенных для поверки бытовых счётчиков газа;
- теоретически и экспериментально исследована возможность использования нагружаемого эластичного резервуара в качестве устройства хранения расходуемой среды, обеспечивающего поддержание стабильного давления в нём;
- на основе теории истечения газа из сопла и диафрагмы составлена математическая модель истечения газа из отверстия в стенке сосуда;
- с учётом полученной модели разработаны, реализованы и экспериментально исследованы две компактные конструкции автоматизированного устройства задания дискретного расхода газа, что позволило количественно определить поправочный коэффициент в рассматриваемой математической модели;
- разработан и реализован экспериментальный образец расходометрического комплекса для поверки бытовых счётчиков газа с использованием разработанных принципов построения его основных узлов: устройства задания расхода, которое также является измерительной частью комплекса, и нагружаемого эластичного резервуара в качестве устройства хранения и стабилизации давления расходуемой среды;
- проведены исследования экспериментального образца, которые подтвердили возможность достижения требуемых основных показателей разрабатываемого испытательного расходометрического комплекса (ИРК).

Объектом исследования являются методы построения испытательных расходомерных установок газа.

Предметом исследования являются способы построения основных узлов испытательных расходомерных установок газа, способы улучшения их характеристик.

Научную новизну работы составляют:

- способ стабилизации давления расходуемой среды, отличающийся использованием устройства хранения расходуемой среды в виде нагружаемого эластичного резервуара;
- математическая модель истечения газа из отверстия в стенке сосуда, отличающаяся от известной модели Сен-Венана наличием поправочного коэффициента, позволяющего учесть различие между давлением в струе газа на выходе из отверстия и непосредственно измеряемым давлением окружающей среды, куда выходит струя газа;
- способ построения испытательного расходометрического комплекса газа, отличающийся использованием измерительной части в виде

дискретного задатчика расхода, реализующего предложенную математическую модель, и устройством хранения и стабилизации давления расходуемого газа в виде нагружаемого эластичного резервуара.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что разработан и исследован ИРК газа, предназначенный для испытаний и поверки бытовых счётчиков расхода газа, с использованием нагружаемого эластичного резервуара в качестве устройства хранения и стабилизации давления расходуемой среды, и оригинального компактного высокоточного дискретного задатчика расхода в качестве измерительной части установки. Разработанный комплекс не уступает по метрологическим характеристикам образцам существующих ИРУ данного класса, обладает высокой производительностью и степенью автоматизации, удобен в эксплуатации, а также отличается меньшими массогабаритными характеристиками, энергоёмкостью, стоимостью производства и эксплуатации. Объём эластичного резервуара экспериментального образца ИРК газа в 10 раз превосходит объём колокольного мерника, что обеспечивает возможность проведения в одном рабочем цикле поверки свыше десятка счётчиков и расширяет диапазон воспроизводимых расходов.

Соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности. Представленная диссертация соответствует п. 1 «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», и п. 3 «Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами» паспорта специальности ВАК 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Реализация результатов работы. Научные и практические результаты работы использованы в процессе выполнения работ по гранту по программе «У.М.Н.И.К.» на выполнение НИР «Создание расходометрического комплекса для проведения исследований и поверки (калибровки) расходомеров-счетчиков газа» и в рамках НИР №5633 «Научно-техническое обоснование и создание математической модели нового низкочастотного акустического метода расходометрии жидкостей и газов» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)», а также внедрены в учебный процесс Юго-Западного государственного университета при изучении дисциплины «Сенсоры и датчики физических величин» направления подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств».

Полученная уточненная математическая модель истечения газа из отверстия использовалась при расчетах точечных диффузоров общеобменной вентиляции и форсуночных распылителей в секциях увлажнения при реконструкции здания ФБГУ «Орловский референтный центр Россельхознадзор» в целях размещения лабораторного блока (корпуса)

соответствующего уровня биологической защиты для работы с возбудителями АЧС.

Методы исследования. При проведении исследований использовались теоретические положения аэро- и термодинамики, методы планирования эксперимента, методы математической статистики, вычислительной математики и математического моделирования с применением вычислительной техники.

Положения, выносимые на защиту:

- использование нагружаемого эластичного резервуара в качестве устройства хранения расходуемой среды позволяет обеспечить достаточную стабилизацию ее давления для проведения поверки бытовых расходомеров и счетчиков газа;

- уточнённая математическая модель истечения газа из отверстия в стенке сосуда, отличающаяся от известной модели Сен-Венана наличием поправочного коэффициента, позволяет рассчитывать скорость истечения газа из отверстия с учетом разницы между неизвестным давлением в струе газа на выходе из отверстия и непосредственно измеряемым давлением окружающей среды, куда выходит струя газа;

- использование устройства дискретного задания расхода с отверстиями, сечение которых рассчитано с учетом предложенной математической модели, и нагружаемого эластичного резервуара в качестве устройства хранения расходуемой среды позволяет повысить производительность и технологичность процедуры поверки бытовых расходомеров газа.

Степень достоверности и апробация результатов основывается на использовании базовых положений технической термодинамики и аэродинамики, известных моделей истечения газов из сопла стандартной формы и диафрагмы, а также результатах проведенных автором исследований с экспериментальным образцом разрабатываемого комплекса.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 8 международных, всероссийских и региональных конференциях и семинарах: международной научно-технической конференции «Диагностика-2009» (г. Курск, ЮЗГУ, 2009); региональном семинаре «Инновация-2010» (г. Курск, ЮЗГУ, 2010); 2-ой международной научно-практической конференции: «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени» (г. Екатеринбург, 2014); 10-ой международной научно-практической конференции: «Наука и инновации-2014» (г. Прага, 2014); международной научно-практической конференции: «Интеллект-2015» (г. Тула, ТГУ, 2015); международной научно-технической конференции «Распознавание-2015» (г. Курск, ЮЗГУ, 2015); на 8-ой международной научно-практической конференции: «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке» (г. Москва, 2015); на 6-ой Международной научно-практической конференции «Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы» (г. Пенза, МЦНС, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 5 в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, получено 2 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения с основными выводами, списка литературы и приложений. Работа изложена на 137 страницах машинописного текста, включающих 32 рисунка, 12 таблиц, список литературы из 108 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований по рассматриваемой теме, приведены общая характеристика диссертационной работы и основные положения, которые автор выносит на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния метрологического обеспечения расходомерии газа и находящихся в эксплуатации испытательных расходомерных установок (ИРУ). Приведена общая структура испытательных расходомерных установок с описанием входящих в нее блоков. Традиционная структура ИРУ включает:

- устройство заправки и хранения расходуемой среды;
- устройство создания и стабилизации расхода (напорное устройство, устройство настройки на требуемый расход и стабилизации расхода);
- испытательный участок трубопровода (служит для монтажа первичных преобразователей испытываемых расходомеров);
- образцовое средство измерения количества расходуемой среды;
- устройство управления и регистрации;
- устройство формирования интервала осреднения (индикаторы границ интервала, средства регистрации сигналов испытываемого расходомера).

Рассмотрены наиболее широко используемые ИРУ для поверки счетчиков расхода газа, в частности, установки с образцовым расходомером, с колокольным газовым мерником, трубопоршневые и многосопловые установки.

Установки с образцовым расходомером являются одними из самых доступных и технологичных, но в соответствии со стандартом ГОСТ Р 8.618-2014 их применение в составе эталонных установок ограничено снизу расходом $2 \text{ м}^3/\text{ч}$, в то время как бытовые счетчики необходимо поверять и при значительно меньших значениях расхода (от $0,016 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Наиболее пригодными для поверки бытовых счётчиков расхода газа любых конструкций являются установки с колокольным газовым мерником, выполняющим функции и устройства хранения и стабилизации давления газа, и измерительной части установки. Колокольный мерник представляет собой цилиндрический колокол, опущенный открытой частью в сосуд с водой. Давление воздуха под колоколом определяется весом колокола. Объем вышедшего из-под него и прошедшего через поверяемый счётчик воздуха определяется глубиной погружения колокола, которая в простейшем случае считывается визуально по шкале на боковой стенке колокола. Погрешность лучших таких установок составляет 0,3-0,5 %. Основными их недостатками является технологическая сложность изготовления колокольных мерников

достаточного объёма (необходимо обеспечивать строгое постоянство площади поперечного сечения полости мерника по всей его высоте), сложная система его подвески, громоздкость и неудобство эксплуатации системы поддержания постоянного уровня воды в баке, куда опускается колокол. Эти установки дороги в изготовлении и эксплуатации, имеют низкую производительность и низкую степень автоматизации процедуры поверки.

Более высокую производительность и степень автоматизации имеют трубопоршневые установки, но они пригодны лишь при давлениях газа более 10 кПа и создают сильные пульсации давления в испытательном участке трубопровода. Поэтому они непригодны для работы с бытовыми счетчиками газа.

Рассмотрены также многосопловые установки, в которых измерительной частью является многосопловое устройство дискретного задания расхода. Эти установки вследствие своей дороговизны редко применяются для поверки бытовых счётчиков.

В конце главы сформулированы основные задачи, решаемые в последующих главах.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию способов стабилизации расхода воздуха и задания расхода воздуха. Было проведено обоснование структуры и принципов построения основных узлов разрабатываемого испытательного расходомерического комплекса и определены основные требования к нему в целом и его новым узлам.

В квартирах и индивидуальных жилых домах для газификации, как правило, используются трубы с внутренним диаметром 20, 25, 32 и 40 мм с максимальным расходом газа соответственно 4, 6, 10 и 16 м³/час. Таким образом, испытательная установка должна быть снабжена испытательным коллектором на номинальные диаметры условного прохода 20, 25, 32 и 40 мм для подсоединения испытуемых расходомеров с соответствующими диаметрами условного прохода. Поскольку основная приведенная погрешность современных бытовых счётчиков газа лежит в пределах 1,5 - 3 %, то с учётом достаточно быстрого прогресса в технике расходомерии, приведенная погрешность измерения расхода на самом малом пределе измерения должна быть не хуже 0,5%, а на верхнем пределе измерения желательно иметь не хуже 0,3 %.

На основе анализа недостатков типовых установок предложено новое перспективное направление создания ИРУ с использованием эластичного резервуара, нагружаемого грузом определённой массы, в качестве устройства хранения и стабилизации давления расходуемой среды, и оригинального устройства дискретного задания расхода в качестве измерительной части установки.

На рисунке 1 изображена структурная схема, описывающая способ построения установки с предложенными элементами. Толстыми стрелками показаны воздушные магистрали, а тонкими – сигнальные линии. Перед проведением поверочных работ воздух нагнетается в разгруженный эластичный резервуар, где накапливается в количестве, не вызывающем

возникновения излишних сил натяжения оболочки (избыточное давление в эластичном резервуаре минимально). Затем на резервуар укладывается плоская плита с грузом заданной массы для получения необходимого давления воздуха. В этом случае при расходе воздуха давление в резервуаре будет поддерживаться постоянным за счёт постоянства массы груза. Устройство задания расхода (УЗР) при достаточно точном поддержании постоянства давления служит и измерительной частью ИРУ, обеспечивая высокую точность задания расхода в калибровочных точках и возможность определения расхода воздуха по перепаду давления на УЗР.

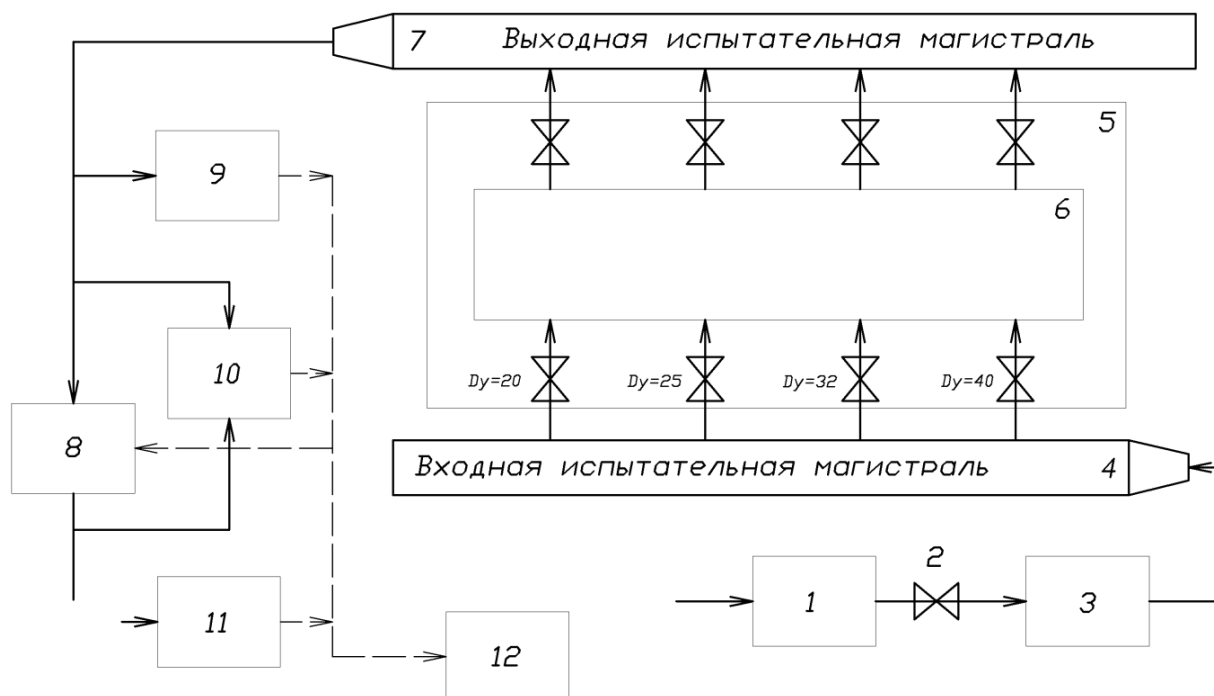


Рисунок 1 – Структурная схема ИРУ газа на основе высокоточного устройства задания расхода и устройства хранения среды в виде эластичного резервуара: 1 – компрессор; 2 – клапан; 3 –нагружаемый эластичный резервуар; 4 – входная испытательная магистраль; 5 – испытательный коллектор; 6 – испытательные участки для монтажа поверяемых расходомеров-счетчиков; 7 – выходная испытательная магистраль; 8 – устройство задания расхода; 9 – датчик температуры; 10– датчик дифференциального давления; 11 – датчик абсолютного давления; 12 – управляющее и регистрирующее устройство

В качестве измерительной части установки используется оригинальное устройство задания расхода, прототипом которого является сужающее устройство в расходомерах переменного перепада давления.

В третьей главе диссертации представлены результаты моделирования процесса истечения газа из отверстия в стенке резервуара и вывод формул расчета расхода воздуха для устройства задания расхода.

Уточненная математическая модель истечения газа из отверстия в стенке сосуда базируется на теории адиабатических процессов изменения состояния газа, т.е. процессов, происходящих без теплообмена с

окружающей средой. При давлении газа p_1 в сосуде объёмом V большим давления p_2 окружающей среды из отверстия будет истекать струя газа со скоростью w_2 , которая будет выше скорости w_1 в сосуде при условии, что диаметр сосуда D много больше диаметра отверстия d . Для нахождения скорости струи w_2 была выведена следующая формула:

$$w_2 = \sqrt{2 \cdot RT \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} + w_1^2, \quad (1)$$

где T – температура газа; R – газовая постоянная (для воздуха $R = 287$ Дж/кг·К); k – показатель адиабаты, равный отношению теплоёмкости при постоянном давлении к теплоёмкости при постоянном объёме (для сухого воздуха $k = 1,405$).

Эта формула основана на формуле Сен-Венана. Из неё следует, что скорость истечения будет зависеть только от температуры газа и отношения давлений внутри и снаружи резервуара, а значит, при постоянстве этих величин скорость истечения газа будет постоянной, не зависящей от величины отверстия. Однако, эта формула будет верна в том случае, если в качестве давления p_2 подставлять в неё давление в струе на выходе из отверстия. А оно там не измеряется и несколько ниже, чем давление в окружающей среде, что точно доказано в теории сужающих устройств, используемых в расходомерах с переменным перепадом давления, создаваемым устанавливаемым в трубопроводе сужающим устройством – соплом или диафрагмой. Кроме того при максимальных расходах, хоть и скорость движения газа в сосуде w_1 будет много меньше w_2 (при поперечных размерах сосуда много больших диаметра трубопровода), w_1 необходимо учитывать.

Методика расчёта сужающих устройств детально разработана и регламентирована в соответствующих нормативных документах. Расходомеры на основе сужающих устройств получили широкое применение в магистральных и распределительных газовых сетях, хотя их точность не высока (приведенная погрешность составляет 1,5-2 %), а диапазон измерений весьма узок ($Q_{\min}/Q_{\max} = 1:3 - 1:5$). Главным их достоинством является расчётный метод градуировки, позволяющий обойтись без проведения их испытаний на ИРУ, а также простота и долговечность самих сужающих устройств. Но, хотя процессы прохождения газа через сужающие устройства в виде диафрагмы весьма близки к тем, что имеют место в предлагаемом ИРУ, есть и важное отличие. Сужающее устройство встраивается в трубопровод, а перепад давления измеряется в сечениях трубопровода, отстоящих на определённые расстояния до сужающего устройства и после него. Формирование потока газа и эпюры давления в различных сечениях трубопровода для стандартных сопел и диафрагм приведены на рисунке 2.

За сужающим устройством в трубопроводе образуется зона пониженного давления, и падение давления зависит от скорости струи, а значит и от расхода. Измеряя дифференциальным манометром этот перепад давления, можно определить расход. Для стандартных сопел максимальный перепад давления будет в сечениях перед соплом и непосредственно за ним, для диафрагмы – на определённом расстоянии за ней, т. к. после выхода из отверстия струя дополнительно сужается и именно в этом сечении (на рисунке 2 это сечение В – В) скорость потока будет максимальной, а давление минимальным. Но в предлагаемом УЗР струя выходит не в тот же трубопровод, а в неограниченную окружающую среду и измеряется перепад давления именно с этой средой. И если в трубопроводе за сужающим устройством в сечении С – С устанавливается постоянное давление p_2 , определяемое давлением до сужающего устройства за вычетом потери давления на нём, то в УЗР давление p_2 – это давление внешней среды (атмосферное). Причём, если в трубопроводе давление p_2 зависит от давления p_1 , то в УЗР оно постоянно и от p_1 не зависит. Поэтому и теорию сужающих устройств без доработки применять к расчету УЗР нельзя.

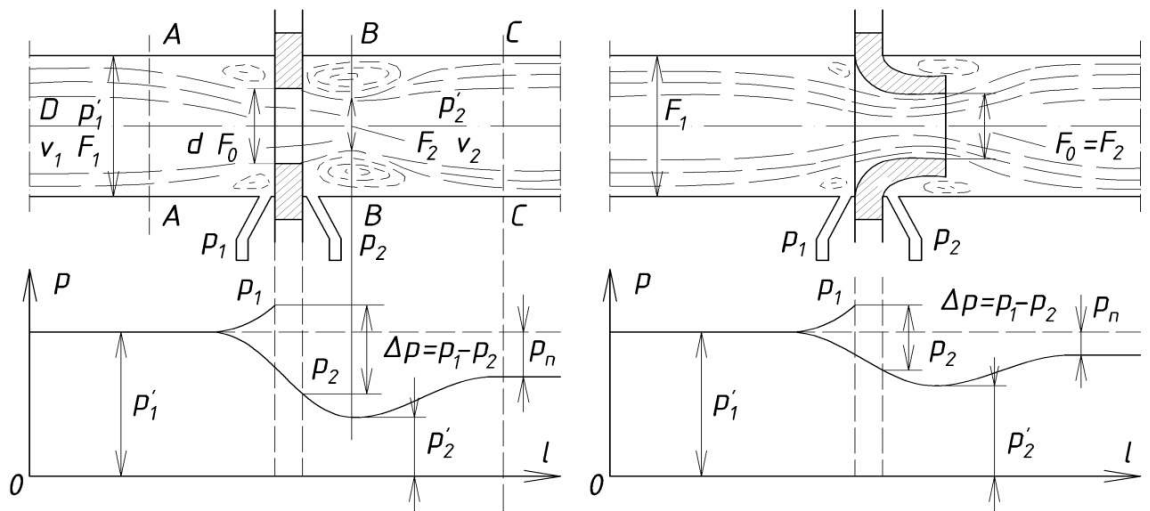


Рисунок 2 – Распределение потока через диафрагму и сопло и соответствующие им графики распределения статического давления

Таким образом, для коррекции формулы Сен-Венана необходимо учесть разницу между давлением в струе (обозначим её p_c) при выходе из отверстия и давлением среды, куда выходит струя. Поскольку давление p_1 поддерживается постоянным, и давление среды p_2 тоже постоянно, а скорость струи не зависит от величины отверстия (от расхода), то, очевидно, что разница давлений ($p_2 - p_c$) тоже не будет зависеть от расхода. А значит, её можно учесть постоянным коэффициентом (обозначим его K_p), вводимым в формулу (1):

$$w'_2 = K_p \cdot w_2 = K_p \sqrt{2 \cdot RT \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} + w_1^2 . \quad (2)$$

Формула (2) позволяет учесть сужение струи воздуха, выходящей через отверстие в стенке сосуда. При этом скорость газа в сосуде w_1 легко подсчитать, зная внутренний диаметр сосуда D_c и расход в каждой поверяемой точке Q_i :

$$w_1 = 4Q_i / \pi D_c^2 . \quad (3)$$

Таким образом, окончательная математическая модель задаваемого расхода в УЗР будет иметь вид:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} w'_2 = K_p \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2RT \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} + w_1^2 . \quad (4)$$

Значение корректирующего коэффициента K_p надёжнее всего определить экспериментально, что выполнено в 4-й главе диссертации.

Было разработано, изготовлено и исследовано два варианта таких УЗР. Первое представляло собой отрезок трубы, в боковой поверхности которой просверлены отверстия, диаметры которых рассчитывались таким образом, чтобы при определённом давлении газа в трубе обеспечивался расход в заданных калибровочных точках. Эти отверстия поочерёдно открывались перемещаемым в полости трубы поршнем с приводом с шаговым двигателем, что обеспечивало точное позиционирование поршня. Предполагалось, что внутренняя поверхность трубы и боковая поверхность поршня будут отполированы и подогнаны друг к другу так, чтобы исключить утечку газа через зазоры между ними. Однако технологически это оказалось сложно и пришлось снабдить поршень резиновыми кольцами, чтобы предотвратить утечку газа через зазоры. Но такое решение оказалось недолговечным, т. к. резиновые кольца со временем истирались, а частицы резины забивали отверстия, влияя тем самым на создаваемый расход газа. Поэтому была разработана вторая конструкция УЗР, представляющая собой цилиндрический сосуд диаметром много большим диаметра трубопровода, торец которого перекрыт диском с проделанными в нём отверстиями, площадь которых рассчитана таким образом, чтобы при заданном давлении в сосуде получать расходы в калибровочных точках шкалы поверяемых счётчиков. Эти отверстия поочерёдно открываются вторым диском, плотно прижатым к первому и поворачиваемым с помощью цифрового привода.

В разрабатываемом комплексе было решено использовать эластичный резервуар в качестве устройства хранения расходуемой среды. Сначала

воздух поступает в него и накапливается в количестве, не вызывающем возникновения излишних сил натяжения оболочки. Затем на резервуар укладывается плоская плита с грузом заданной массы для получения необходимого давления воздуха. В этом случае при расходе воздуха давление в резервуаре будет поддерживаться постоянным за счёт постоянства груза. Данный способ схож с используемым в действующих ИРУ колокольным мерником, но в этом случае не требуется бак с водой, не нужно следить за постоянством уровня воды в нём, не нужна сложная система подвески и частичного уравнивания колокола.

В четвертой главе диссертации кратко описан экспериментальный образец испытательного расходометрического комплекса с изготовленным УЗР в виде соосных дисков, приведены результаты экспериментальных исследований ИРК.

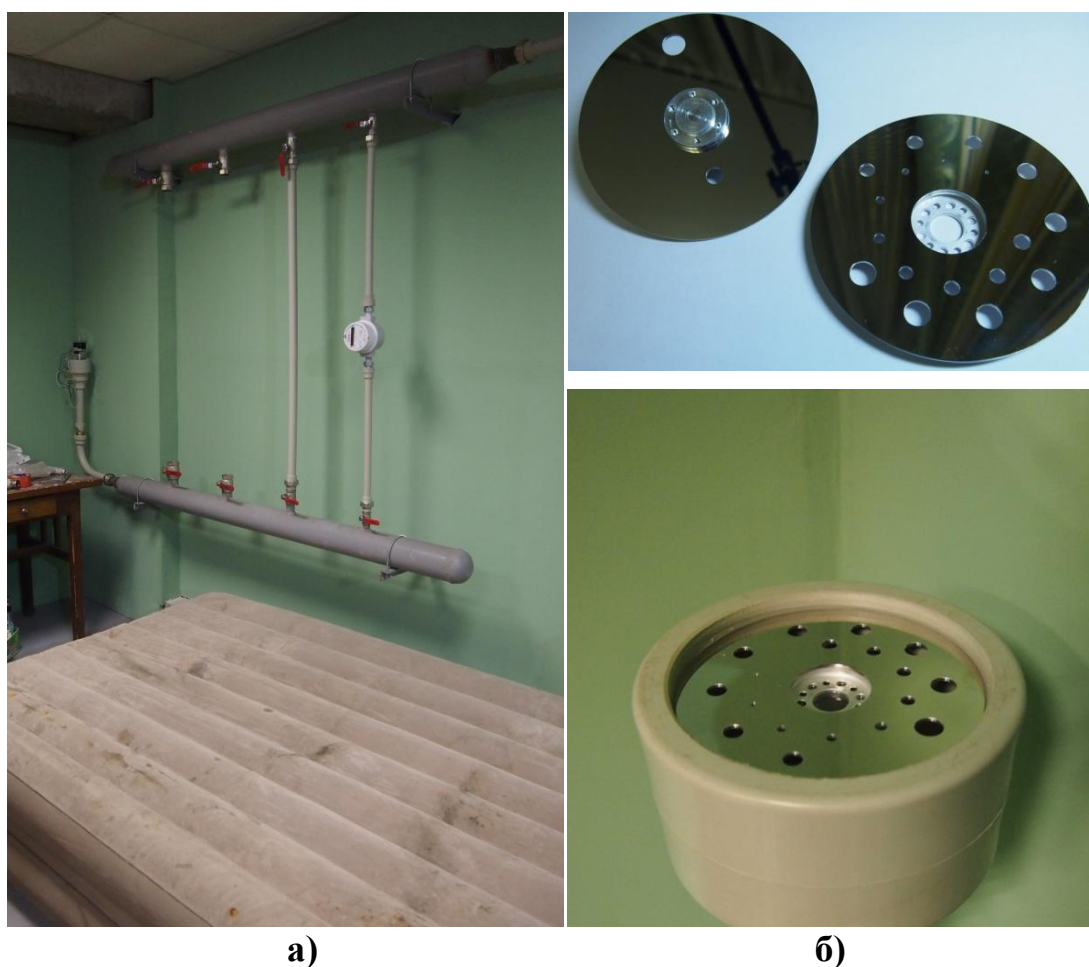


Рисунок 3 – Фотографии экспериментального образца ИРК газа (а) и устройства задания расхода в виде соосных дисков (б)

Для определения численного значения корректирующего коэффициента K_p обязательно требовалось произвести испытания ИРК с эталонным расходомером. Однако, при испытаниях ИРК с эталонным ролико-лопастным расходомером ОР-40 был выявлен ряд этого расходомера, которые приводят к невозможности его использования в ИРУ для поверки бытовых счётчиков газа. Поэтому в качестве эталонного расходомера

пришлось использовать струйный счётчик газа Гранд-4 с приведенной погрешностью $\pm 1,5\%$. Перепад давления на УЗР измерялся датчиком избыточного давления Метран-150-CG1, датчик настроен на диапазон измерений $(-2,5 \dots +2,5)$ кПа, предел допускаемой основной погрешности $0,1\%$.

Было проведено 5 серий экспериментов. В соответствии с количеством отверстий различного диаметра в УЗР в каждой серии задавалось 18 значений расхода в диапазоне от 2-х до 100 % от максимального, и для каждой экспериментальной точки рассчитывались численные значения поправочного коэффициента и отклонения от его среднего значения. По этим данным выборочное значение математического ожидания поправочного коэффициента равно $K_p = 0,619$, а отклонения от него по пяти сериям эксперимента представлены на рисунке 4. Из него следует, что отклонения в каждой точке задания расхода по всем сериям эксперимента группируются весьма тесно (отклонения по каждой точке много меньше, чем между точками). Это говорит о том, что отклонения между точками вызваны несоответствием фактических диаметров отверстий расчётным значениям. Эту погрешность можно устранить, если точно измерить фактические диаметры отверстий (с помощью, например, измерительных микроскопов). При этом, естественно, калибровочные значения расхода несколько сместятся, но это вполне допустимо. Остаточную погрешность можно подсчитать, найдя средние значения отклонений по 5 сериям в каждой точке, а затем подсчитав среднее между сериями отклонение. В этом случае максимальные отклонения в каждой точке по пяти сериям не превышают $0,35\%$, среднее арифметическое значение отклонений $0,11\%$, а среднеквадратичное отклонение $0,08\%$. Таким образом, в промышленных образцах установки вполне достижима погрешность измерения расхода в $0,3-0,5\%$.

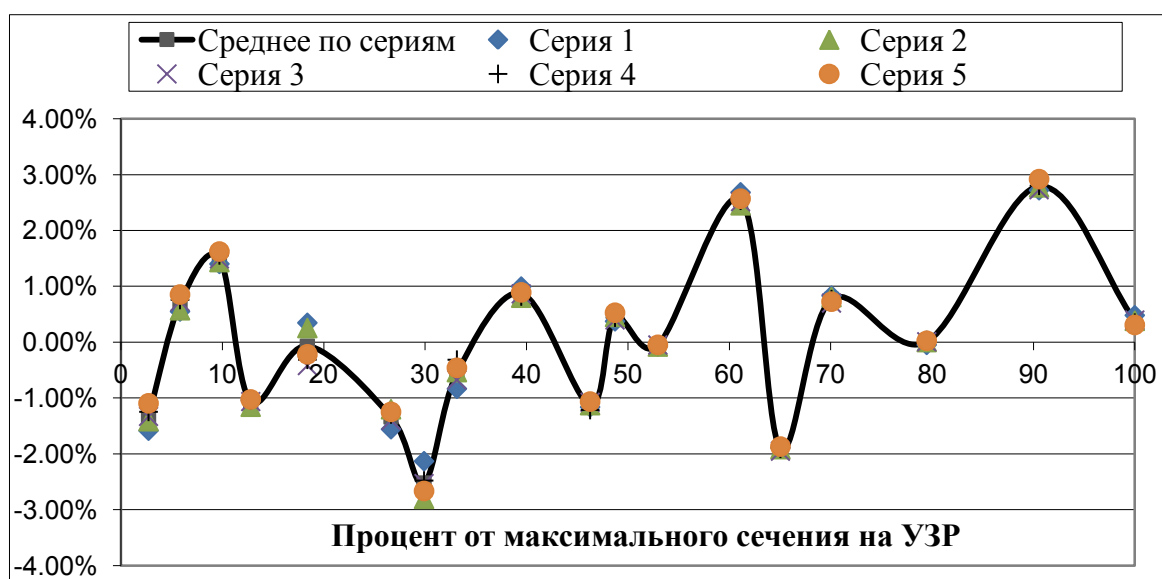


Рисунок 4 – Отклонения значений поправочного коэффициента K_p от среднеарифметического значения в точках задания расхода

Для определения стабильности задаваемого расхода с помощью эластичного резервуара было проведено 4 цикла испытаний, во время которых он накачивался примерно одинаковым объемом воздуха, затем на него помещался груз массой 200 кг, который обеспечивал избыточное давление в резервуаре порядка 600 Па. На рисунке 5 приведены графики значений избыточного давления в УЗР во время испытаний при открытом отверстии максимального сечения. Из него следует, что на рабочем участке характеристики давление снижается весьма медленно и строго линейно, и его стабильность позволяет проводить поверочные работы. Если накачка резервуара проведена правильно, то линейный участок начинается сразу после открытия отверстия (2 цикл на графике), при избыточной накачке, начальный участок нелинейный.

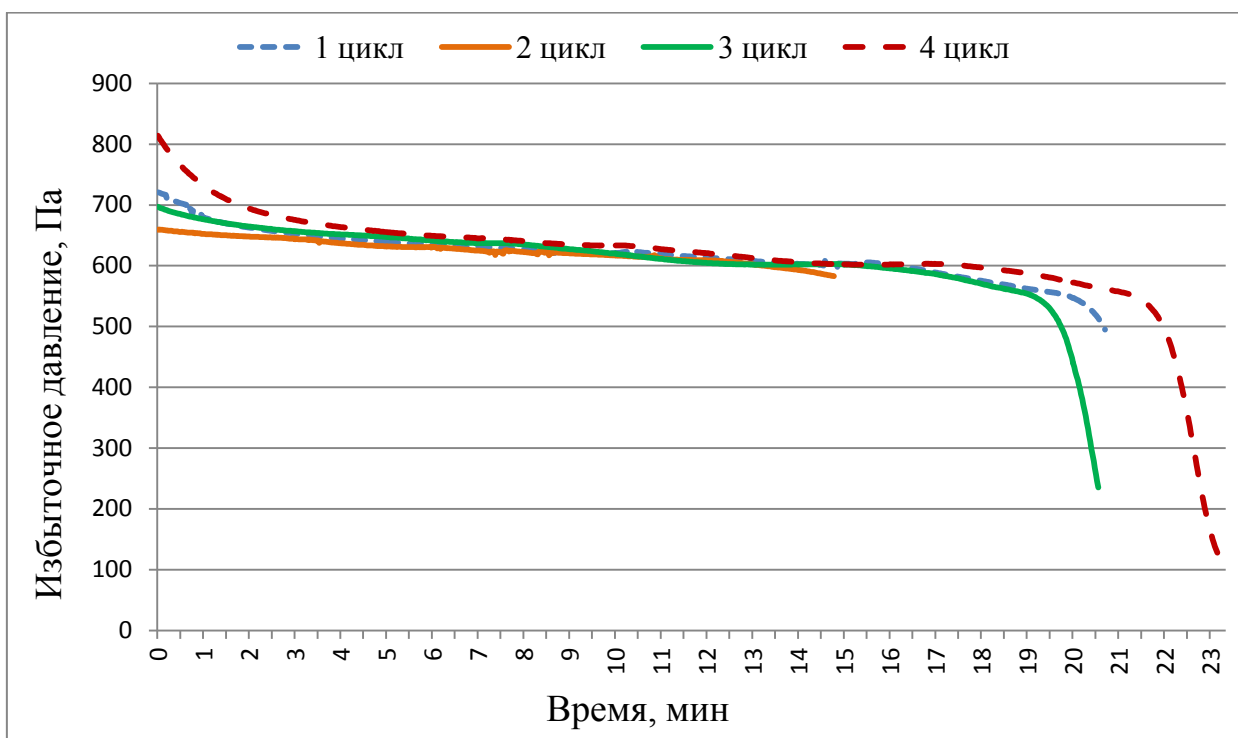


Рисунок 5 – Графики значений избыточного давления перед УЗР по мере истечения воздуха из эластичного резервуара

На рабочем участке характеристики скорость изменения расхода воздуха изменяется не более чем на 0,5 %/мин. Учитывая, что давление измеряется каждую секунду и, соответственно, каждую секунду производится расчёт текущего расхода, 15-30 секунд вполне достаточно, чтобы точно рассчитать средний расход в каждой данной точке. Даже при максимальном расходе линейный участок длится не менее 15 минут, при меньших расходах, он соответственно удлиняется. При проверке бытовых счётчиков газа контролируется 4 точки шкалы. При автоматизации всей процедуры на контроль одного счётчика потребуется не более 1,5-2-х минут. Это позволит даже с резервуаром того же объёма (1 м³), что использовался в экспериментальном образце, получить производительность ИРК на уровне

десяти поверенных бытовых счетчиков за один цикл накачки резервуара. В то время как ИРУ с колоколом объемом $0,1 \text{ м}^3$ за один цикл обеспечивает поверку одного расходомера. Таким образом, разработанный ИРК выгодно отличается от установок с колокольным мерником простотой в обслуживании, возможностью обеспечения высокой степени автоматизации процедуры поверки, меньшей стоимостью элементов ИРК, большей емкостью резервуара с воздухом, более широким динамическим диапазоном задаваемых расходов.

Заключение содержит следующие результаты и выводы по работе:

1. На основе анализа недостатков существующих ИРУ газа предложено альтернативное направление исследований и определены требуемые метрологические и технико-экономические характеристики ИРУ для самых массовых бытовых счётчиков расхода газа.

2. Разработан, обоснован и экспериментально исследован способ стабилизации давления воздуха путем использования эластичного резервуара, нагружаемого грузом необходимой массы, в качестве источника расходуемой среды, выгодно отличающийся от аналогов высокой технологичностью, меньшей стоимостью и простотой эксплуатации.

3. Разработан, теоретически и экспериментально исследован способ дискретного задания расхода путём истечения газа из поочередно открываемых отверстий в стенке сосуда, в котором поддерживается постоянное избыточное давление газа, и доказана его пригодность в качестве измерительной части расходометрического комплекса.

4. Разработана уточнённая математическая модель для представленного выше способа дискретного задания расхода, учитывающая различие между давлением в струе газа на выходе из отверстия и непосредственно измеряемым давлением окружающей среды, куда выходит струя газа; доказано, что этот коэффициент не зависит от задаваемой величины расхода.

5. Проведены исследования экспериментального образца испытательного расходометрического комплекса, реализующего предложенные способы стабилизации давления расходуемой среды и дискретного задания расхода, показавшие, что экспериментальный образец в 10 раз превосходит типовые колокольные установки по количеству поверяемых расходомеров за один цикл заполнения устройства хранения расходуемой среды, а также имеет более простую в эксплуатации и обслуживании конструкцию.

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при построении новых расходометрических установок и комплексов газа и при модернизации имеющихся в эксплуатации образцов.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Экспериментальные исследования ИРК с эластичным резервуаром и устройством дискретного задания расхода в виде сосуда, торец которого перекрыт двумя соосными дисками, обеспечивающими поочередное открывание отверстий разной площади для задания нужных значений расхода, доказали его работоспособность и перспективность в качестве измерительной части ИРУ.

Он намного проще, технологичней и дешевле в производстве и эксплуатации, чем существующие ИРУ. Для организации промышленного производства таких ИРК необходимо провести проектирование, изготовление и метрологическую аттестацию опытного образца ИРК, при этом серийные образцы ИРК не будут нуждаться в экспериментальной метрологической аттестации, т. к. она обеспечивается математической моделью. Потребуется лишь контроль точности выполнения отверстий в задающем диске УЗР. В этом случае вполне достижима основная приведённая погрешность ИРК в пределах от 0,3 до 0,5 %, что полностью удовлетворяет требованиям по точности поверочных ИРУ для существующих и перспективных моделей бытовых расходомеров-счётчиков газа.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Дрейзин, В.Э. Испытательный расходомерный комплекс для расходомеров-счетчиков газа / В.Э. Дрейзин, **П.С. Борзенков** // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика, медицинское приборостроение. – 2015. – №1(14). – С.42-50.

2. **Борзенков, П.С.** Устройства создания и стабилизации расхода в испытательной расходомерной установке газа / **П.С. Борзенков** // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика, медицинское приборостроение. – 2015. – №1(14). – С.58-65.

3. Дрейзин, В.Э. Прототипный испытательный расходомерный комплекс для расходомеров-счетчиков газа: испытание устройства задания расхода / В.Э. Дрейзин, **П.С. Борзенков** // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика, медицинское приборостроение. – 2015. – № 4(17) – С. 35-40.

4. Дрейзин, В.Э. Прототипный испытательный расходомерный комплекс для расходомеров-счетчиков газа: разработка конструкции устройств задания и стабилизации расхода газа / В.Э. Дрейзин, **П.С. Борзенков** // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Управление, вычислительная техника, информатика, медицинское приборостроение. – 2016. – № 1(18) – С. 66-72.

5. **Борзенков, П.С.** Испытательная расходомерная установка с эластичным резервуаром / **П.С. Борзенков, В.Э. Дрейзин** // Естественные и технические науки. – 2017. – №5(107) –С. 133-136.

Патенты на изобретение:

6. Пат. 2476830 Российская Федерация, МПК G 01 F 25/00. Установка для испытания расходомеров-счетчиков газа / Дрейзин В.Э., Рыжиков С.С., **Борзенков П.С.**, Бондарь О.Г.; заявитель и правообладатель Юго-Западный

государственный университет. – № 2011122088/28; заявл. 31.05.2011; опубл. 27.02.2013, Бюл. №6. – 3 с.: 1 ил.

7. Пат. 2571303 Российская Федерация, МПК G 01 F 25/00. Испытательная установка для расходомеров-счетчиков газа / **Борзенков П.С.**, Дрейзин В.Э., Бондарь О.Г., Рыжиков С.С.; заявитель и правообладатель Юго-Западный государственный университет. – № 2014121641/28; заявл. 28.05.2014; опубл. 20.12.2015, Бюл. №35. – 3 с.: 1 ил.

Статьи и доклады в других изданиях:

8. **Борзенков, П.С.** Проведение первых экспериментов с прототипной испытательной расходомерной установки для расходомеров-счетчиков газа / **П.С. Борзенков** // American Scientific Journal. – 2016. – №6 (6) /2016 – С. 57-61.

9. **Борзенков, П.С.** Общие сведения об учете газа и влиянии внешних факторов на приведение расхода газа к стандартным условиям / **П.С. Борзенков** // Вестник современной науки: Научно-теоретический журнал. – 2016. – № 12: в 2-х ч. Ч. 1. – С. 18-22.

10. **Борзенков, П.С.** Используемые испытательные расходомерные установки газа / **П.С. Борзенков** // Наука и инновации – 2014: материалы X международной научно-практической конференции. – Прага: Publishing House «Education and Science», 2014. – С.98-101.

11. **Борзенков, П.С.** Устройства создания и стабилизации расхода в испытательных расходомерных установках газа / **П.С. Борзенков** // Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени: материалы II международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: Национальная ассоциация ученых (НАУ), 2014. – №2, ч.3. – С.11-14.

12. **Борзенков, П.С.** Автоматизированные испытательные расходомерные установки / **П.С. Борзенков** // Распознавание-2015: материалы XII международной научно-технической конференции. – Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2015. – С.57-59.

13. **Борзенков, П.С.** Тахометрические расходомеры в испытательных расходомерных установках газа / **П.С. Борзенков** // Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке: материалы XIII международной научно-практической конференции. – М., Международное научное объединение «Prospero», 2015. – №1(13). – С.5-7.

14. **Борзенков, П.С.** Классификация автоматизированных испытательных расходомерных установок жидкости / **П.С. Борзенков** // Интеллект-2015: материалы международной научно-технической конференции. – Тула: Тульский государственный университет, 2015. – С.76-79.

15. **Борзенков, П.С.** Классификация применяемых в промышленности расходомеров-счетчиков газа / **П.С. Борзенков** // Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы: сборник статей VI Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2017. – С. 42-45.

Подписано в печать __.01.2018 г. Формат 60x84/16 Гарнитура Times New Roman. Объем 1,0 усл. п.л.
Тираж 100 экз. Заказ № _____
Отпечатано с готового оригинал-макета ИП Бескровным А.В. 305029, г. Курск, ул. К. Маркса, 61/Б