

На правах рукописи



САЛИН ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГАЗОВЫХ ФИЛЬТРОВ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПУНКТАХ РЕДУЦИРОВАНИЯ ГАЗА**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2020

Работа выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Усачев Александр Прокофьевич

Официальные оппоненты: **Коньгин Сергей Борисович**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «СамГТУ» / кафедра машины
и оборудование нефтегазовых и химических
производств, заведующий кафедрой

Иванов Эрнест Сергеевич
кандидат технических наук,
ООО «Газпром трансгаз Уфа» /
производственно-диспетчерская служба,
начальник

Ведущая организация Акционерное общество «Газпром промгаз»
(Московская область, г. Видное)

Защита диссертации состоится 19 февраля 2021г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Латыпов Олег Ренатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время в результате реализации Программы ПАО «Газпром» по газификации регионов Российской Федерации совместно с администрациями субъектов удалось увеличить потребление газа на внутреннем рынке и повысить рост общего количества находящихся в эксплуатации пунктов редуцирования газа в среднем на 15 тыс. шт. в год.

С ростом количества пунктов редуцирования газа все более широкое распространение в качестве очистного оборудования получают цилиндрические газовые фильтры. Они составляют порядка 94 % от общего количества фильтров, и показывают себя как наиболее экономичные, эффективные и удобные в процессе эксплуатации. Указанные устройства являются важным элементом по очистке газа, поступающего в регулирующее, защитное и предохранительное оборудование пунктов редуцирования газа. Вместе с этим они являются важным звеном, оказывающим влияние на безопасность при подготовке и подаче газа в технологическое оборудование пунктов редуцирования газа. Результаты анализа аварий и инцидентов, произошедших за период с 2011 года по 2018 год на сетях газораспределения, показывают, что в 10 % случаев причиной их возникновения являются разрушение и деформация фильтрующих устройств вследствие превышения нормативного значения перепада давления при засорении твердыми примесями (состоящим в основном из оксидов железа, гетитов, песка). Данная ситуация возникает по причине несовершенства конструкций, низкой прочности и отсутствия способов достоверной и своевременной оценки предельных перепадов давления на фильтрующих устройствах, что в ряде случаев, приводит к их деформации и разрушению и, как следствие, к аварийным ситуациям на сетях газораспределения.

Также на данный момент отсутствуют принципы компоновки фильтрующих устройств с повышенным отношением их высоты к диаметру, позволяющих оптимизировать габаритные размеры газовых фильтров и технологического помещения пункта редуцирования газа, что существенно повышает их материало- и капиталоемкость. Также на данный момент отсутствует обоснование места и способа установки датчиков перепада давления фильтрующего устройства с повышенным отношением его высоты к диаметру.

Таким образом, указанные проблемы в полной мере не нашли своего решения и актуальной задачей становится совершенствование конструкции фильтрующих устройств с целью увеличения их ресурса и разработка способа достоверного определения перепада давления на фильтрах в пунктах редуцирования газа.

Степень разработанности темы

Решению отдельных вопросов указанной задачи посвящены труды Биргера М.И., Шура И.А., Усачева А.П., Шурайца А.Л., Желанова В.П. и

других исследователей. Однако, несмотря на большой вклад многих исследователей, остается ряд вопросов, возникающих в процессе эксплуатации газовых цилиндрических фильтров при существующих реалиях поступающего газа в газораспределительные сети. Непроработаны вопросы с ресурсом фильтрующих устройств и местами отбора и измерения перепада давления.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы» (нефтегазовая отрасль), а именно п. 5 «Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов, и оценки их экономической эффективности и ресурса» и п. 7 «Разработка и повышение эффективности методов технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации и продления ресурса».

Цель работы

Увеличение ресурса цилиндрических фильтрующих устройств и разработка способа контроля перепада давления на них при установке в пунктах редуцирования газа.

Задачи исследования:

1 Анализ существующих конструкций фильтрующих устройств, устанавливаемых в газовые фильтры, и методов оптимизации их конструктивного исполнения.

2 Повышение ресурса эксплуатации цилиндрических газовых фильтров путем разработки нового достоверного способа измерения перепада давления.

3 Расчет и подбор оптимальных конструктивных и геометрических параметров новой конструкции цилиндрического фильтрующего устройства с увеличенными прочностными и ресурсными характеристиками. Определение оптимального количества фильтрующих устройств, устанавливаемых в цилиндрический газовый фильтр, обеспечивающих требуемую долговечность и устойчивость конструкции при условии минимизации затрат на изготовление.

4 Разработка экспериментального стенда по испытаниям и внедрение опытной конструкции цилиндрического газового фильтра оснащенного фильтрующими устройствами, установленными один на другой, имеющими гофрированную оболочку и датчиками статического давления для контроля перепада давления.

Научная новизна

1 Установлена зависимость величины измеренного перепада давления на газовом фильтрующем устройстве от координат установки датчиков давления, позволяющая увеличить достоверность измерения перепада давления на 50 - 70% по сравнению с существующими способами.

2 Предложены уточненные формулы для определения геометрических параметров фильтрующих устройств газовых фильтров, состоящих из трехслойной оболочки с однотипными продольными гофрами,

обеспечивающих двукратное увеличение прочности и ресурса фильтрующих устройств.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании выбора оптимальных параметров конструкции цилиндрического газового фильтра и фильтрующего устройства исходя из условий обеспечения работоспособности, безопасности, качества и надежности эксплуатации.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1 Разработана конструкция гофрированного фильтрующего устройства, имеющая оптимальные конструктивные и геометрические параметры, обеспечивающая устойчивость и надежность работы газовых фильтров при максимальном перепаде давления. Данная конструкция защищена патентом № RU 166735 и применена при разработке конструкторской документации фильтров газовых типа ФГ, выпускаемых АО «Гипрониигаз» (г. Саратов).

2 Разработана конструкция датчиков перепада давления, позволяющая достоверно и качественно контролировать перепад давления на фильтрующих устройствах путем их установки до и после фильтрующих сеток. Конструкция защищена патентом № RU 157997 и применена при разработке стандартов организации СТО 03321549-047-2016 и ГОСТ 34011-2016.

3 Разработана конструкция газового фильтра оптимизированной формы, которая защищена патентом № RU 158000 и внедрена в производство фильтров газовых типа ФГ, выпускаемых АО «Гипрониигаз» (г. Саратов).

4 Разработан и изготовлен экспериментальный стенд, позволяющий проводить исследования вновь разрабатываемых газовых фильтров в условиях, приближенных к реальным, с моделированием входного давления, расхода и перепада давления.

5 На основе разработанных технических решений изготовлена и испытана серия цилиндрических газовых фильтров типа ФГ, выпускаемых АО «Гипрониигаз» (г. Саратов) и внедрена на действующих опасных производственных объектах ГРП №60 в г. Волгограде и ГРП №67/8 в г. Воронеже.

Методология и методы исследований

В ходе диссертационного исследования применялись теоретические и экспериментальные методы: математического моделирования, системного подхода, математической статистики, сравнительного анализа, теории планирования эксперимента и обработки опытных данных.

Положения, выносимые на защиту

1 Способ измерения перепада давления на фильтрующих устройствах в цилиндрических газовых фильтрах и конструктивное исполнение датчиков измерения перепада давления. Зависимость величины измеренного перепада давления на газовом фильтрующем устройстве от координат установки датчиков давления, позволяющая увеличить достоверность измерения перепада давления на 50 - 70% по сравнению с существующими способами.

2 Новая конструкция цилиндрического фильтрующего устройства, выполненная из 3-слойной оболочки и однотипных продольных гофр с увеличенными прочностными и ресурсными характеристиками.

3 Опытная конструкция цилиндрического газового фильтра с фильтрующими устройствами, установленными один на другой, оснащенными гофрированной оболочкой и датчиками статического давления для контроля перепада давления и конструкция экспериментального стенда для исследования разрабатываемых газовых фильтров.

4 Результаты экспериментальных исследований опытного образца цилиндрического газового фильтра.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивалась применением широко апробированных методик, экспериментальными исследованиями, которые проводились на оборудовании, прошедшем государственную поверку и аттестацию. Перед построением графических зависимостей все экспериментальные данные обрабатывались с использованием подходов теории ошибок эксперимента и математической статистики. Достоверность результатов работы подтверждается также приемлемой сопоставимостью с результатами экспериментов, полученных на опытно-промышленных образцах газовых фильтров, и результатами исследований других авторов.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: Международной научно-практической конференции «Тенденции развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения» (Саратов, 2013); Научно-практических конференциях «Энергоэффективность. Проблемы и решения» при проведении Российских энергетических форумов (Уфа, 2013-2015); научно-практических конференциях «Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа» в рамках Нефтегазовых форумов (Уфа, 2014, 2015); Международной научно-практической конференции «Газораспределение – инновационные технологии, материалы, оборудование» (Саратов, 2013); Международной специализированной выставке газовой промышленности и технических средств для газового хозяйства (Санкт-Петербург, 2018, 2019); научно-технических конференциях СГТУ (Саратов, 2012-2018); Международной научно-практической конференции молодых ученых (Саратов, 2014); Научно-технических советах АО «Гипрониигаз» (Саратов, 2013-2018).

Публикации

Результаты диссертации легли в основу 17 печатных работ, включая 5 в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ. Получено 3 патента РФ и разработаны 2 нормативных документа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, основные выводы, библиографический список использованной литературы, включающий

163 наименования. Работа изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

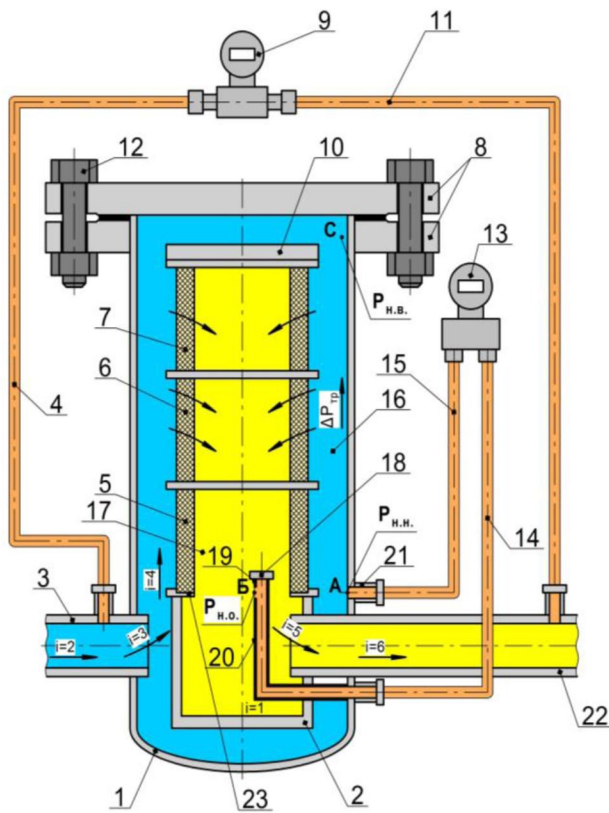
Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана достоверность полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, выделены объекты и предметы исследования, показаны научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность результатов работы.

В первой главе проведен анализ существующих типов фильтрующих устройств по очистке газа от твердых примесей, устанавливаемых в пунктах редуцирования газа для подготовки газа, поступающего в технологическое оборудование (регуляторы давления и т.д.), а затем к потребителям газа. В сетях газораспределения в подавляющем большинстве применяются 4 типа газовых фильтрующих устройства, основу которых составляют тканевые, зернистые, волокнистые и сетчатые фильтрующие материалы. Проведенный анализ показывает, что в системах очистки газа использование фильтрующих устройств сетчатого типа является наиболее технически и экономически целесообразным. В тоже время остался нерешенным ряд вопросов, связанных со значительной материалоемкостью фильтрующих устройств, низкой стойкостью к истиранию при проходе газа с высокой скоростью, значительной трудоемкостью очистки, малой пропускной способностью на единицу массы, большими перепадами давления, разрушением и уносом в процессе эксплуатации фильтрующего материала.

Также в данной главе были проведены исследования существующих конструкций газовых фильтров и применяемых сетчатых фильтрующих устройств, которые выявили ряд проблем, связанных с высокими расходами на обслуживание, значительной материалоемкостью корпуса, недостаточной прочностью и ресурсом, низкой пропускной способностью конструкции, а также с недостоверным замером перепада давления.

Вторая глава посвящена разработке способа достоверного контроля перепада давления путем установки датчиков сразу до и после фильтрующей сетки в нижней части фильтрующих устройств, а также разработке их конструкции, которая повышает надежность эксплуатации газовых фильтров за счет увеличения точности и достоверности измерения перепада давления в среднем на 50-70 % по сравнению с существующими конструкциями, где датчики перепада давления установлены на патрубках фильтра.

В наиболее распространенных конструкциях цилиндрических газовых фильтров, применяемых в сетях газораспределения (Рисунок 1), можно измерить только перепад давления между входным 3 и выходным 22 патрубками ΔP_{ϕ} с помощью дифференциальных манометров или индикаторов перепада давления 9.



1 – корпус; 2 – стакан; 3, 22 – входной и выходной патрубки; 4, 11, 14, 15 – трубы для замера перепада давления; 5, 6 и 7 – фильтрующие устройства; 8 – крышка и фланец корпуса фильтра; 9, 13 – дифф. манометры; 12 – болтовое соединение; 16 – пространство между фильтрующими устройствами 5, 6, 7 и корпусом фильтра 1; 17 – внутреннее пространство фильтрующих устройств 5, 6 и 7; 18 – заглушка; 19 – отверстие для замера статического давления очищенного газа в вертикальной трубке-датчике 20; 21 – трубка-датчик для замера статического давления газа в кольцевом пространстве 16; 23 – опорное кольцо

Рисунок 1 – Схема фильтра оснащенного фильтрующими устройствами с возможностью замеров перепадов давления между входным и выходным патрубками фильтра 3 и 22 и на фильтрующих устройствах 5, 6 и 7

Тогда перепад давления между входным 3 и выходным 22 патрубками фильтра ΔP_{ϕ} включает потери давления на корпусе 1 ΔP_{κ} и перепад давления $\Delta P_{\text{цфу}}$ на цилиндрических фильтрующих устройствах 5, 6 и 7:

$$\Delta P_{\phi} = \Delta P_{\kappa} + \Delta P_{\text{цфу}} = \frac{\sum_{i=1}^I \zeta_i \cdot \omega_i^2 \cdot \rho_i}{2} + \Delta P_{\text{цфу}}, \quad (1)$$

где i – ряд конструктивных элементов корпуса (Рисунок 1) фильтра, включающих: $i=1, 2, 3, 4, 5, \dots, I$; ζ_i – коэффициент местного сопротивления i -го конструктивного элемента фильтра; ω_i – скорость газа в i -м конструктивном элементе фильтра, м/с; ρ_i – плотность природного газа в i -м конструктивном элементе, кг/м³.

Учитывая, что скорость газа в элементах корпуса фильтра ω_i , принимаемая по нормативным требованиям, может достигать 25 м/с, что в значительной степени превышает скорость газа, проходящего через ячейки

фильтрующих устройств, принимаемая в расчетах обычно от 0,3 до 1,5 м/с, величина перепада давления на нем, как видно из формулы (1), будет выше, $\Delta P_k > \Delta P_{цфу}$. Тогда в данном случае отсутствует возможность качественного и достоверного определения перепада давления на фильтрующих устройствах 5, 6 и 7 в связи с измерением суммарного перепада давления $\Delta P_{цфу}$ совместно с потерями давления на корпусе фильтра ΔP_k .

Выбор мест и способа установки датчиков перепада давления выполнялся путем анализа потерь давления при течении газа вдоль вертикально установленных один на другой фильтрующих устройств 5, 6 и 7 (Рисунок 1).

Из Рисунка 1 следует, что поток газа направлен снизу-вверх вдоль блока фильтрующих устройств 5, 6 и 7, а, следовательно, величина давления газа в нижней точке А ($P_{н.н.}$) определяется как сумма давления газа в точке С ($P_{н.в.}$) и потерь давления $\Delta P_{тр}$ при течении газа между точками А и С:

$$P_{н.н.} = P_{н.в.} + \left(\frac{\lambda \cdot H}{d_{эк}} + \zeta \right) \cdot \frac{Q^2 \cdot \rho}{2 \cdot F^2}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент потерь на трение по длине; H – высота блока цилиндрических фильтрующих устройств 5, 6 и 7, м; $d_{эк}$ – эквивалентный диаметр внутреннего кольцевого пространства между внутренней поверхностью корпуса фильтра и наружной поверхностью цилиндрических фильтрующих устройств, м; ζ – величина коэффициента местного сопротивления при вертикальном течении потока вдоль корпуса; Q – расход газа через блок фильтрующих устройств, м³/ч; F – проходное сечение пространства между внутренней поверхностью корпуса фильтра и наружной поверхностью фильтрующих устройств, м²; ρ – плотность газа во внутреннем пространстве фильтра при его фактическом давлении, кг/м³.

Анализ формулы (2) и Рисунка 1 показывает, что разница величин давлений между неочищенным и очищенным газом на фильтрующем устройстве в точке А будет больше по сравнению с точкой С, поэтому через точку А будет протекать большее количество неочищенного газа по сравнению с точкой С. Результаты расчетов для фильтров DN 350 и DN 50 на чистых фильтрующих устройствах по формуле (2) показали, что при одинаковой скорости потока газа в пространстве 16, давление в точке А будет выше примерно на 2 % по сравнению с давлением в точке С (Рисунок 1).

Тогда предельная величина перепада давления в нижней части фильтрующего устройства 5 будет достигнута в более ранний период, чем в других точках замера. Это дает возможность более раннего оповещения и информирования обслуживающего персонала, а также своевременную очистку фильтра для предотвращения деформации, разрушения фильтрующих устройств и, как следствие, аварийных ситуаций на сетях газораспределения.

По результатам анализа формулы (2) был разработан способ, обеспечивающий качественный и достоверный замер перепада давления на фильтрующем устройстве. В соответствии с предлагаемым способом замера

перепада давления на фильтрующих устройствах (Рисунок 1), датчик 21 для отбора давления неочищенного газа устанавливается в нижней части корпуса 1 фильтрующего устройства и соединяется с внутренним пространством 16, что позволяет газу по импульсной трубке 15 поступать к дифференциальному манометру 13 для измерения давления. Узел для отбора давления очищенного газа выполняется в виде вертикальной трубки-датчика 20, который введен во внутреннее пространство 17 фильтрующего устройства 5 в нижней его части таким образом, чтобы отверстие 19 было выполнено сбоку на уровне размещения входа датчика 21. Таким образом, датчики 20 и 21 измеряют разность статических давлений неочищенного и очищенного газа до и после цилиндрического фильтрующего устройства 5.

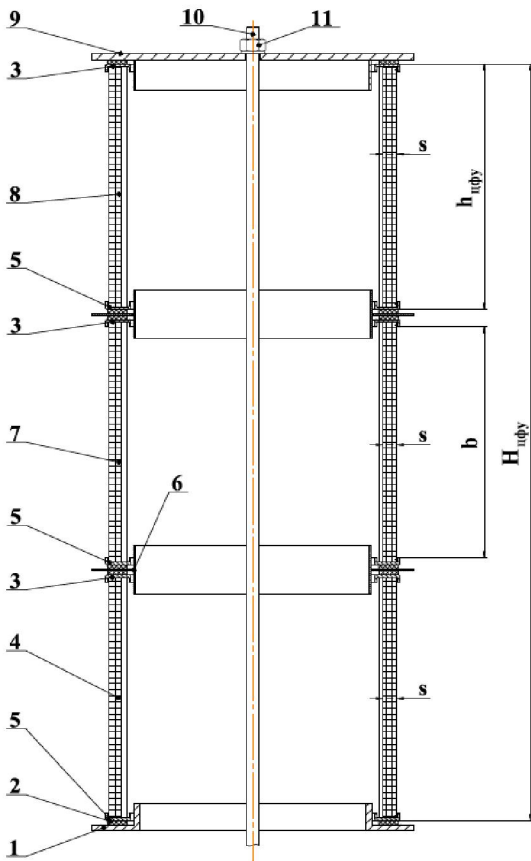
Таким образом, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость (2) и способ по установке датчиков перепада давления в наиболее засоренной твердыми частицами нижней части фильтрующего устройства, что обеспечивает возможность более раннего оповещения обслуживающего персонала для своевременного удаления накопившихся засорений из устройств очистки.

Сведения, полученные от газораспределительных организаций, показывают, что одной из основных причин возникновения инцидентов и аварийных ситуаций, приходящихся на пункты редуцирования газа, являются деформация и разрушение сеток фильтрующих устройств в связи с несовершенством их конструкции и малым ресурсом эксплуатации.

В целях предотвращения деформации и разрушения сеток, а также для увеличения ресурса работы между очередными очистками от примесей, предложена конструкция (Рисунок 2), представляющая собой разборный блок из нескольких фильтрующих устройств 4, 7 и 8, соединенных в единое устройство с помощью специальной струбцины, состоящей из резьбовой шпильки 10, пластин 1 и 9, гайки 11 и фиксирующих колец 6.

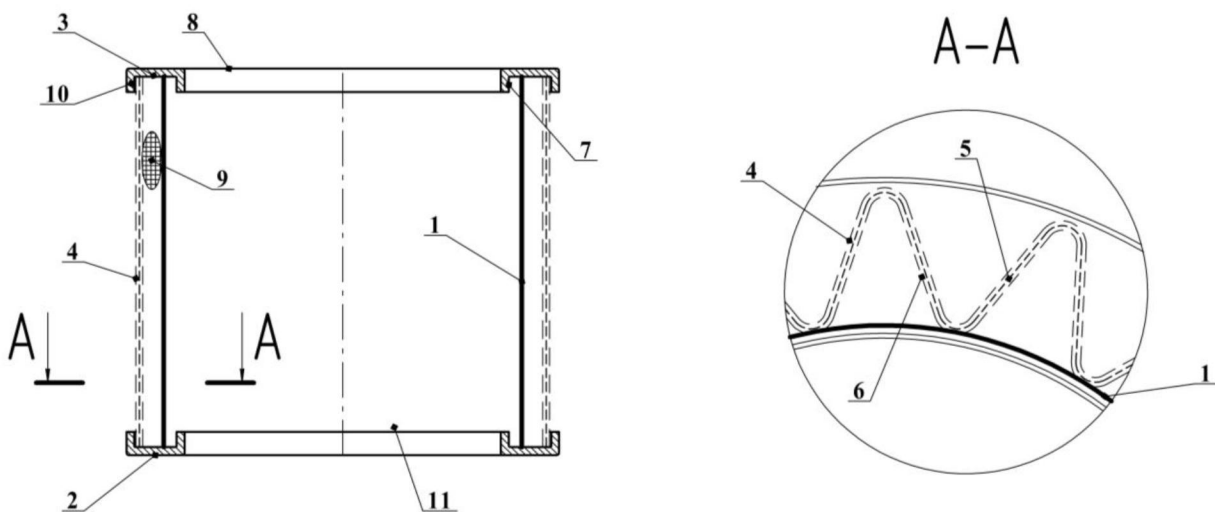
Каждое фильтрующее устройство (Рисунок 3) имеет внутреннюю цилиндрическую обечайку 1, опорные кольца 2 и 3, фильтрующую сетку 5, наружную и внутреннюю цилиндрические гофрированные защитные оболочки 4 и 6 из утолщенной сетки. На боковых поверхностях защитных оболочек 4 и 6 выполнены однотипные продольные гофры из металлической сетки, которые выполняют функцию ребер жесткости каждого из фильтрующих устройств разборного блока.

Важным вопросом при конструировании и эксплуатации опорной оболочки фильтрующего устройства сетчатого типа является расчет их количественных и геометрических характеристик.



1 – основание стакана;
 2 – герметизирующая прокладка; 3,
 5 – верхнее и нижнее поперечные
 ребра жесткости каждой опорной
 оболочки; 4, 7 и 8 – нижняя, средняя
 и верхняя опорные оболочки
 цилиндрических фильтрующих
 устройств; 6 – фиксирующее кольцо;
 9 – крышка; 10 – резьбовая
 шпилька; 11 – гайка; b – расстояние
 между внутренними сторонами
 поперечных ребер жесткости, м

Рисунок 2 – Схема блока из
 соединенных между собой
 фильтрующих устройств,
 установленных один на другой



1 – цилиндрическая обечайка, 2, 3 – опорные кольца; 4, 6 – наружная и
 внутренняя цилиндрические гофрированные защитные оболочки из
 утолщенной сетки; 5 – фильтрующая гофрированная поверхность; 7, 10 –
 внутренняя и наружная круглые стенки крышки; 8 – отверстие для прохода
 газа; 9 – ячейки цилиндрических фильтрующих устройств 5; 11 – отверстие в
 основании 2
 для выхода очищенного газа

Рисунок 3 – Схема конструкции гофрированного цилиндрического
 фильтрующего устройства

Согласно Рисунку 3, количество гофр в единой трехслойной конструкции оболочки определяется как:

$$n_{\text{гц}} = \frac{\pi D_{\text{в}}}{2((h_{\text{г}} - 2d_{\text{гц}}) \cdot \text{tg}\alpha_{\text{гц}} + d_{\text{гц}})}, \quad (3)$$

где $D_{\text{в}}$ – внутренний диаметр гофрированного цилиндрического фильтрующего устройства, м; $h_{\text{г}}$ – высота одной гофры единой трехслойной конструкции, м, определяется как разность наружного и внутреннего диаметров, то есть $h_{\text{г}} = (D_{\text{н}} - D_{\text{в}})/2$; $D_{\text{н}}$ – наружный диаметр гофрированного цилиндрического фильтрующего устройства, м; $d_{\text{гц}}$ – наружный диаметр закруглений в вершине гофр гофрированного цилиндрического фильтрующего устройства и равный ему наружный диаметр закруглений в основании гофр, м; $\alpha_{\text{гц}}$ – угол между высотой и боковой стороной одной гофры.

Площадь поверхности опорной цилиндрической гофрированной оболочки, выполненной из утолщенной сетки, определяется по формуле

$$F = \left(\frac{2 \cdot (h_{\text{г}} - 4 \cdot (S_{\text{ф}} - \delta_{\text{ф}}) - d_{\text{гц}})}{\cos\alpha_{\text{гц}}} + \pi d_{\text{гц}} - 2 \cdot (S_{\text{ф}} - \delta_{\text{ф}}) \right) \cdot H \cdot n_{\text{гц}}, \quad (4)$$

где: $S_{\text{ф}}$ – толщина сеток фильтрующего устройства, м; $\delta_{\text{ф}}$ – величина запаса на удлинение сетки фильтрующего устройства при гнутье гофр в их вершинах и основаниях, м; H – высота фильтрующего устройства.

Обеспечение требуемого ресурса работы и надежности фильтрующих устройств, установленных один на другой в условиях периодического повышения перепада давления на фильтрующих устройствах до предельного значения $\Delta P_{\text{пр}}$ без деформации формы и разрушения, достигается путем заключения их в защитные гофрированные оболочки и последующего соединения в единый блок, укрепленный от поперечных смещений с помощью специальной струбины, состоящей из резьбовой шпильки 10, пластин 1 и 9, гайки 11 и фиксирующих колец 6.

На основе предложенной конструкции опорного блока из фильтрующих устройств, заключенных в трехслойные оболочки с однотипными продольными гофрами (Рисунки 2 и 3), получены уточненные формулы для определения оптимальных значений геометрических параметров, при предельном перепаде давления $\Delta P_{\text{пр}} = 20$ кПа. Для упрощения общая задача разделена на две более простые на основе метода декомпозиции:

А) Определение устойчивости и прочности опорного блока из цилиндрических фильтрующих устройств общей высотой $H_{\text{цф}}_{\text{у}}$, нагруженных предельным перепадом давления $\Delta P_{\text{пр}}$ с наружной стороны (Рисунок 2) для обеспечения ресурсного срока его эксплуатации.

Б) Определение устойчивости, а также предотвращение нарушения формы и разрушения каждого из однотипных фильтрующих устройств блока,

заклученных в трехслойные оболочки с продольными гофрами высотой $h_{\text{цф}} = H_{\text{цф}}/n_{\text{цф}}$, нагруженных предельным перепадом давления $\Delta P_{\text{пр}}$ с наружной стороны (Рисунок 3).

Решение первой задачи А). В качестве допущения принято, что защитные и фильтрующие сетки цилиндрической оболочки имеют гладкую, а не гофрированную поверхность толщиной S . Целевая функция по определению оптимальных значений геометрических параметров S , $h_{\text{цф}}$, h_p (Рисунок 2) опорного блока из фильтрующих устройств, нагруженных предельным перепадом давления $\Delta P_{\text{пр}}$, записывается в виде:

$$\sum_{p=1}^p K_p(S, h_{\text{цф}}, h_p) = \min, \quad (5)$$

где K_p – капитальные вложения в изготовление опорных оболочек фильтрующих устройств, руб./кг; S – толщина стенки цилиндрических оболочек, м (Рисунок 2); $h_{\text{цф}}$ – расстояние между поперечными ребрами жесткости по их осям, численно равное высоте каждого из фильтрующих устройств, м; h_p – высота поперечного ребра жесткости, м.

В качестве примера для расчетов был выбран газовый фильтр с диаметрами входных патрубков 350 мм и диаметром корпуса 500 мм, так как данный типоразмер является одним из наиболее распространённых в сетях газораспределения. Результаты расчетов по формуле (5), выполняемые численным методом для нескольких значений толщин стенки S опорной обечайки диаметром 460 мм, показывают, что оптимальные значения параметров составляют: $S_{\text{opt}} = 1,2$ мм, $h_{\text{цф, opt}} = 200$ мм, $h_{p, \text{opt}} = 42$ мм. В этом случае при общей высоте фильтрующего блока $H_{\text{цф}} = 1200$ мм (Рисунок 3), определяемой согласно (4) исходя из обеспечения необходимой фильтрующей площади, количество фильтрующих устройств принимаемых к установке, составит $n_{\text{цф}} = H_{\text{цф}}/h_{\text{цф, opt}} = 1200/200 = 6$ шт. Тогда блок из шести фильтрующих устройств представляет собой гладкую цилиндрическую оболочку из утолщенной сетки толщиной $S_{\text{opt}} = 1,2$ мм, укрепленную семью кольцевыми ребрами жесткости с расстоянием между ними, равным $h_{\text{цф, opt}} = 200$ мм и высотой каждого ребра, равным $h_{p, \text{opt}} = 42$ мм.

Решение второй задачи Б) Устойчивость трехслойной цилиндрической оболочки каждого из фильтрующих устройств, а также предотвращение нарушения формы и разрушения, согласно Рисунку 3, достигается путем выполнения на боковых поверхностях цилиндрических оболочек параллельных их оси однотипных продольных гофр, равномерно распределенных по всей цилиндрической поверхности. При этом наружная и внутренняя защитные сетки расположены друг относительно друга на расстоянии, равном толщине фильтрующей сетки, образуя вместе с ней слитную трехслойную гофрированную структуру.

Результаты проведенных расчетов на устойчивость при наличии продольных гофр в опорной оболочке показали, что для наиболее распространенного типоразмера фильтрующих устройств при наружном

диаметре 460 мм и высоте $h_{\text{цф.опт}} = 400$ мм с высотой ребра 42 мм из утолщенной сетки толщиной $S_{\text{опт}} = 1,2$ мм, будет обеспечена необходимая устойчивость при предельном перепаде давления $P_{\text{пр}} = 20,0$ кПа путем установки только трех устройств $n = 3$ шт. с обеспечением таким образом ресурсного срока его эксплуатации.

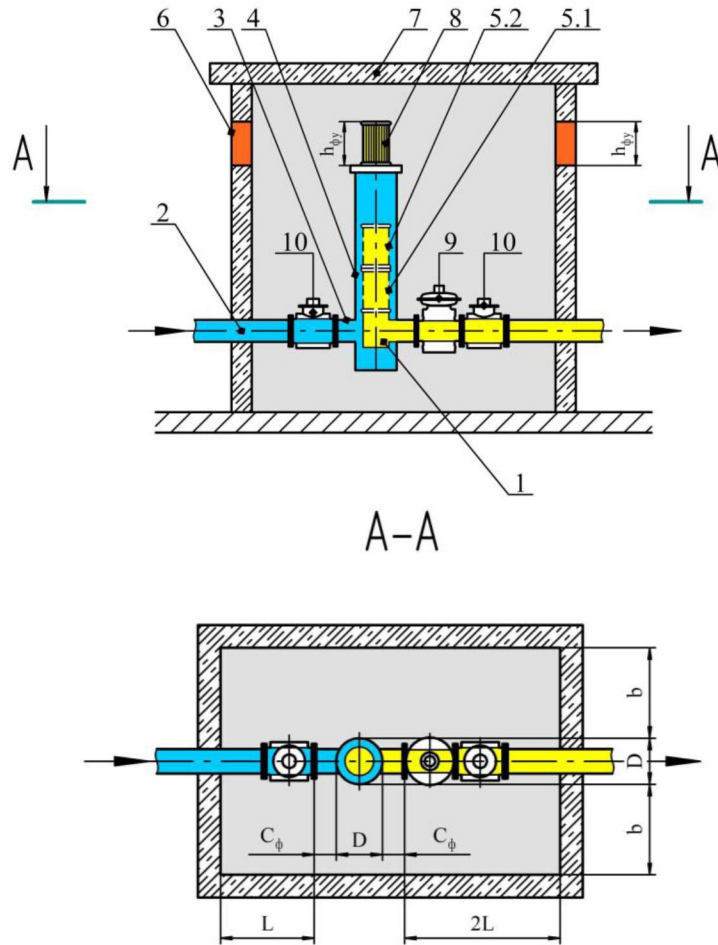
Так, в соответствии с проведенными расчетами устойчивость конструкции цилиндрических фильтрующих устройств при наличии продольных гофр в опорной оболочке увеличивается в два раза по сравнению с негофрированными фильтрующими устройствами, имеющими такие же габаритные размеры. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 54983 проведение регламентных работ по очистке фильтрующего оборудования должно проводиться не реже 1 раза в 6 месяцев (4320 часов) или при достижении предельного перепада давления. Тогда для достижения предельного перепада давления разработанной конструкции необходимо в 2 раза больше времени, соответственно и ресурс их работы до проведения очистки возрастает до 8640 часов.

Таким образом, предложенные принципы и положения позволяют предотвратить деформацию и разрушение фильтрующей сетки, обеспечить двукратное увеличение устойчивости и надежности конструкции от преждевременного разрушения при воздействии предельного перепада давления по сравнению со стандартной конструкцией фильтрующего устройства. Кроме того, выполнение на боковых поверхностях цилиндрических оболочек однотипных продольных гофр позволяет увеличить площадь фильтрующей поверхности и, соответственно, пропускную способность фильтрующего устройства без изменения его габаритов по сравнению с плоской конструкцией.

Третья глава посвящена обоснованию оптимального количества фильтрующих устройств, установленных один на другой и обеспечению минимальных затрат в газовые фильтры, расположенные в пунктах редуцирования газа.

Современные оптимальные конструкции цилиндрических газовых фильтров по результатам исследований Усачева А.П., Шурайца А.Л., Густова С.В. и с точки зрения экономической целесообразности изготавливается с соотношением высоты корпуса к его диаметру, равному 4,0. При этом фильтрующее устройство, которое располагается внутри корпуса фильтра, выполняется как единая неразборная конструкция. Для демонтажа такого фильтрующего устройства необходимо предусматривать при строительстве дополнительную высоту технологического помещения пункта редуцирования газа, равную высоте фильтрующего устройства $H_{\text{ф.у.}}$.

Для устранения указанного недостатка предложено осуществлять установку не одного цилиндрического фильтрующего устройства высотой $H_{\text{ф.у.}}$, а нескольких устройств меньшей высоты, количеством $n_{\text{ф.у.}}$, которые будут устанавливаться один на другой (Рисунок 4), с высотой каждого из них, равной $h_{\text{ф.у.}} = H_{\text{ф.у.}}/n_{\text{ф.у.}}$.



1 – стакан; 2 – входной газопровод; 3,4 – входной патрубок и корпус фильтра; 5.1, 5.2 – соответственно первое и второе фильтрующие устройства высотой h_{fy} ; 6 – часть стены здания газорегуляторного пункта, высотой h_{fy} , необходимая для извлечения фильтрующих устройств; 7 – перекрытие и кровля здания; 8 – фильтрующее устройство высотой h_{fy} , извлеченное из корпуса фильтра; 9, 10 – газовое оборудование, расположенное совместно с фильтром; C_ϕ – длина входного и выходного патрубков фильтра; D – диаметр фильтра; L – длина помещения пункта редуцирования газа, отводимая для размещения единицы оборудования, расположенного рядом с фильтром; b – расстояние между боковыми поверхностями помещения пункта редуцирования газа и оборудованием

Рисунок 4 – Расчетная схема обоснования оптимального количества фильтрующих устройств, установленных один на другой в пунктах редуцирования газа

С одной стороны, увеличение количества вертикально установленных фильтрующих устройств позволит упростить процесс демонтажа и уменьшить высоту помещения, а с другой стороны, увеличение количества фильтрующих устройств приведет к росту стоимости изготовления единичного устройства.

Предлагаемая функциональная зависимость затрат, определяющая оптимальное количество фильтрующих устройств, выражается в виде функции затрат (6).

В качестве критерия оптимальности функции (6) принят минимум интегральных затрат в фильтрующие устройства (количеством $n_{\text{фy}} = N_{\text{фy}}/h_{\text{фy}}$) и в ограждающие конструкции технологического помещения, необходимого для демонтажа фильтрующих устройств:

$$Z = \left[\sum_{p=1}^P K_p (N_{\text{фy}}/h_{\text{фy}}) + \sum_{t=1}^T \alpha_t \sum_{m=1}^M \varphi_{m,p} \sum_{p=1}^P K_p (N_{\text{фy}}/h_{\text{фy}}) \right] = \min; \quad (6)$$

$$\alpha_t = (1 + E)^{-t}, \quad p = \overline{1, P}, \quad m = \overline{1, M},$$

где $K_p(N_{\text{фy}}/h_{\text{фy}})$ – капитальные вложения в изготовление p -го элемента, руб.; p – элемент капитальных вложений, изменяющийся от 1 до P ; α_t – коэффициент дисконтирования, год; E – норма дисконта, 1/год; t – расчетный год эксплуатации, изменяющийся от 1 до T ; m – элемент эксплуатационных затрат, изменяющийся от 1 до M ; $\varphi_{m,p}$ – доля годовых отчислений от ΔK_p в m -й вид ремонта и обслуживания при эксплуатации p -го элемента, 1/год.

В соответствии с формулой 6 были выполнены расчеты по определению оптимального количества цилиндрических фильтрующих устройств для фильтра с диаметром присоединительных патрубков 350 мм, как одного из наиболее распространенных в сетях газораспределения. Результаты расчетов представлены на графике (Рисунок 5).

Как видно из графика, оптимальное количество фильтрующих устройств для фильтра DN 350, расположенного в технологическом помещении пункта редуцирования газа, составляет $n_{\text{фy.opt}} = 3$ шт.

Результаты расчетов для уменьшенного диаметра входного и выходного патрубков фильтра показывают сокращение значения $n_{\text{дфy.opt}}$. Так, для фильтра DN 50, оптимальное количество фильтрующих устройств составляет $n_{\text{дфy.opt}} = 1$ шт.

Дополнительно проведенные расчеты показывают, что разработанный способ размещения нескольких фильтрующих устройств малой высоты, а также зависимости по обоснованию их оптимального количества позволяют обеспечить сокращение интегральных затрат в газовые фильтры в 1,42 раза по сравнению с существующими аналогами, в котором устанавливается только одно фильтрующее устройство большой высоты.

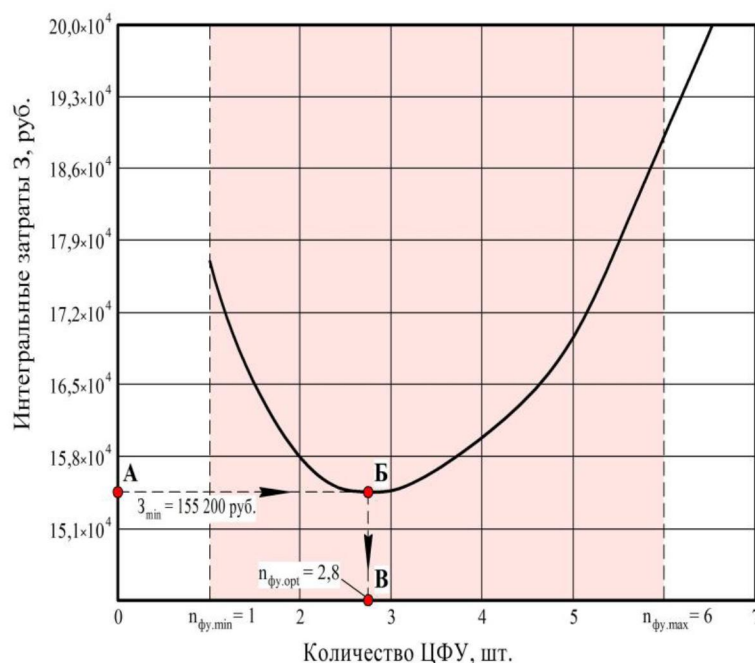


Рисунок 5 – График определения количества фильтрующих устройств для фильтра DN 350, размещаемого в технологическом помещении пункта редуцирования газа

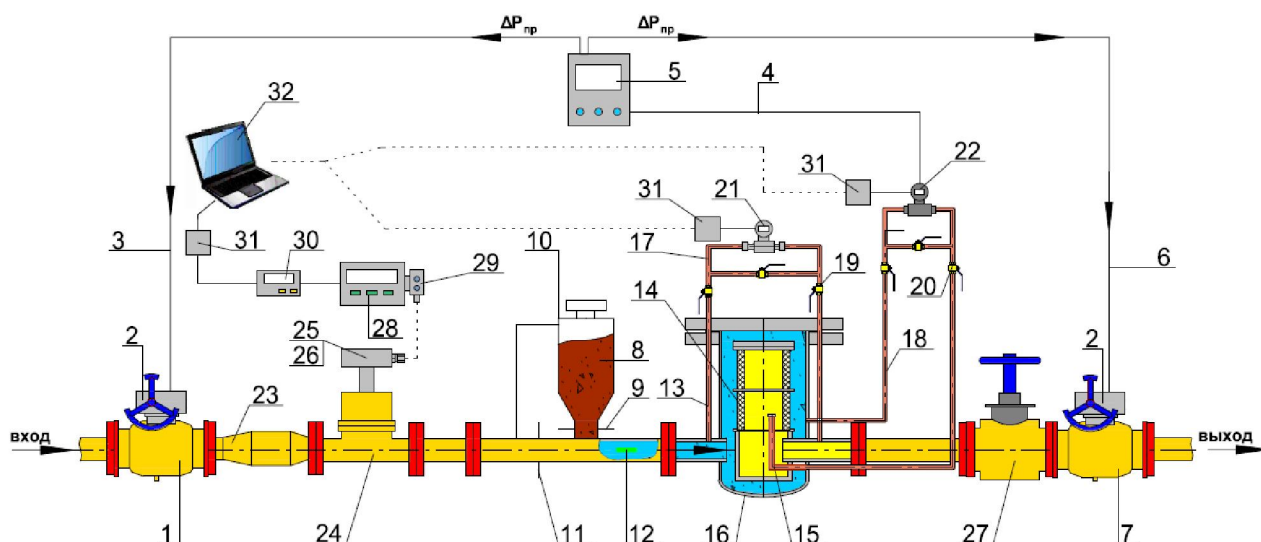
В четвертой главе представлены результаты разработок экспериментального стенда, планирования экспериментов, статистической обработки результатов исследования и технических решений, полученных в главах 2 и 3, направленных на определение оптимальных конструктивно–геометрических параметров газовых фильтров.

Экспериментальные исследования проводились на опытном образце цилиндрического газового фильтра марки ФГ50 DN 50 в натуральную величину и гофрированных фильтрующих устройствах (3 шт.) диаметром 120 мм, высотой 200мм с толщиной фильтрации 80 мкм.

Задачами экспериментальных исследований являются:

1. Проверка правильности и достоверности выбора способа установки и способа замера перепада давления до и после фильтрующего устройства.
2. Доказательство правомерности разработанных уравнений по определению геометрических параметров опорных гофрированных цилиндрических оболочек при достижении предельных значений перепада давления.

Разработан и изготовлен экспериментальный стенд, схема которого приведена на Рисунке 6. Стенд позволяет проводить исследования вновь разрабатываемых газовых фильтров в условиях, приближенных к реальным, с моделированием входного давления, расхода среды и перепада давления.



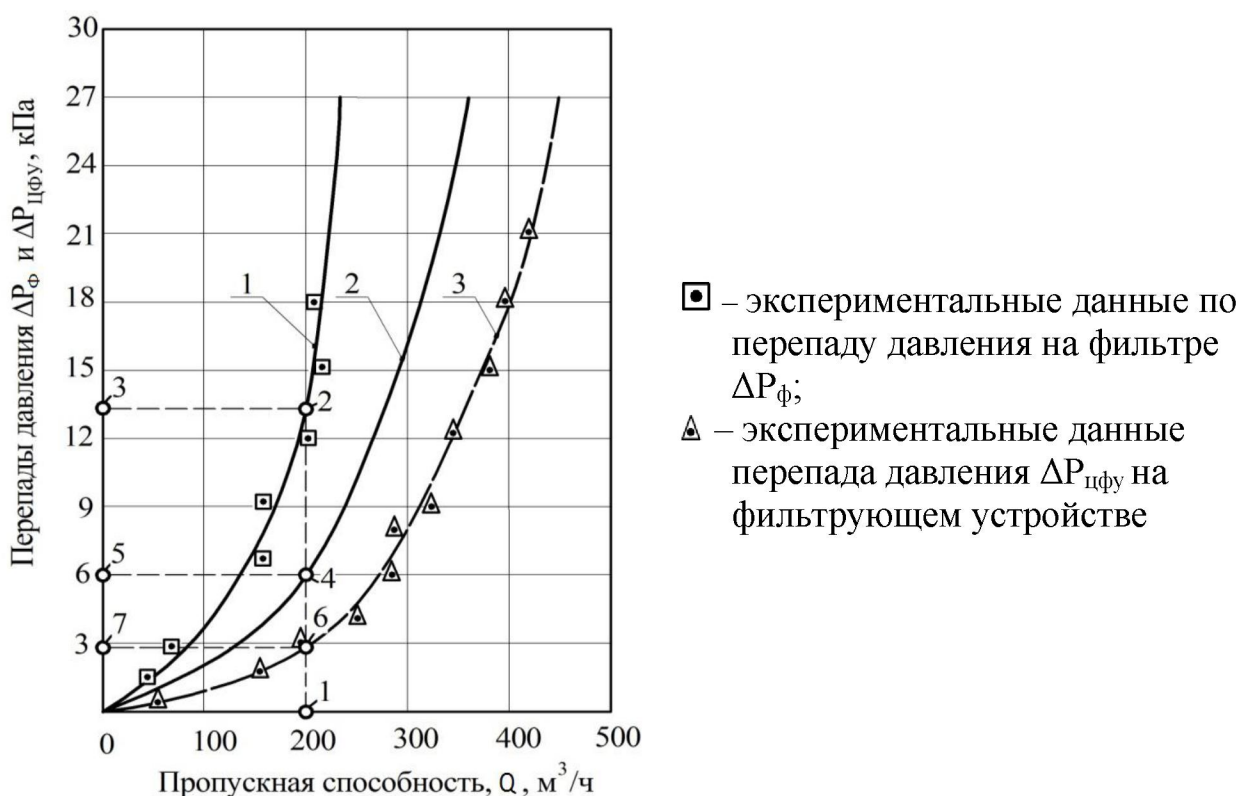
1, 7 – шаровые краны; 2 – электропривод; 3, 6 – сигнальные линии; 5 – прибор управления; 8 – сосуд для подачи механических частиц; 9 – дозировочное отверстие песчаных частиц; 10 – трубка выравнивания давления; 11 – сопло для эжектирования песчаных частиц; 12 – распределитель песчаных частиц в потоке газа; 13 – датчик давления до и после фильтра; 14 – цилиндрическое фильтрующее устройство; 15 – датчик давления после фильтрующего устройства; 16 – цилиндрический фильтр; 17 – импульсные трубки; 18 – датчик давления до фильтрующего устройства; 19, 20 – краны; 21, 22 – дистанционные датчики-преобразователи для замера перепада давления на фильтрующем устройстве 14 и фильтре 16; 23 – турбулизатор к счетчику-расходомеру; 24 – вихревой счетчик для измерения расхода ИРВИС–РС4–Пп–16–ППС; 25, 26 – клеммная коробка и блок первичных преобразователей расхода, давления и температуры; 27 – вентиль для плавного регулирования расхода; 28, 29 – блок обработки сигналов; 30 – регистратор измеренных величин; 31 – интерфейс; 32 – компьютер, оснащенный программой для графического отображения показаний и управления процессом контроля величин перепадов давления

Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки

На первом этапе выполнения экспериментальных исследований была проведена проверка существующего способа определения перепада давления на цилиндрических фильтрующих устройствах. Газовый фильтр с установленными датчиками перепада давления на патрубках (стандартная конструкция) и на фильтрующем устройстве (исследуемая конструкция) монтировался в экспериментальную установку. В фильтре устанавливалось чистое гофрированное фильтрующее устройство, затем создавались различные условия эксплуатации и вариации входных параметров (входное давление, расход газа), и фиксировались показания перепада давления на дифференциальных манометрах стандартной и исследуемой конструкции датчиков. Так же проводились испытания с фильтрующим устройством и без него для подтверждения точности измерения перепадов давления. После

проведения испытаний был построен график экспериментальных и расчетных данных. На графике (Рисунок 7) в виде экспериментальных точек на кривой 1 отмечены перепады давления в корпусе фильтра ΔP_k и на фильтрующем устройстве $\Delta P_{цфу}$, полученные при испытании фильтра марки ФГ50. Кривые 1, 2 получены путем расчетов по формуле (1). Как видно из Рисунка 7, теоретические значения перепада давления, полученные по формуле (1), показали хорошую сходимость с экспериментальными данными. Из графика на Рисунке 7 также видно, что величина потерь давления на фильтре ΔP_ϕ сильно зависит от расхода газа, отнесенной к площади сечения для прохода газа и от скорости течения газа.

Так, при пропускной способности испытываемого фильтра ФГ50, равной $200 \text{ м}^3/\text{ч}$, перепад давления на фильтре составляет $\Delta P_\phi = 13,7 \text{ кПа}$ для кривой 1 (точки 1→2→3). Если увеличить диаметр корпуса фильтра на один типоразмер (кривая 2) при его изготовлении, перепад давления при том же расходе, равном $200 \text{ м}^3/\text{ч}$, составит только $\Delta P_\phi = 6,0 \text{ кПа}$ (точки 1→4→5).



1, 2 – теоретические кривые потерь давления на фильтре, полученные по формуле (1); 3 – пунктирная кривая, построенная по экспериментальным данным потерь давления на фильтрующим устройстве

Рисунок 7 – График перепадов давления на фильтре и на фильтрующем устройстве в зависимости от расхода газа

Также на графике (Рисунок 7) приведены результаты замеров перепада давления $\Delta P_{цфу}$ на фильтрующем устройстве без учета падения давления на корпусе в виде штрихпунктирной кривой 3, полученной путем аппроксимации

экспериментальных данных, показанных в виде треугольников. Из графика видно, что величина потерь давления на фильтрующем устройстве $\Delta P_{\text{цфу}}$ для той же пропускной способности испытываемого фильтра ФГ50, равной $200 \text{ м}^3/\text{ч}$, составляет 2,8 кПа (точки 1→6→7 на Рисунке 7).

Таким образом, результаты, приведенные на графике 7, доказывают некорректность определения перепада давления $\Delta P_{\text{ф}}$ на входном и выходном патрубках 3 и 22 (Рисунок 3) и, следовательно, степени засорения фильтра, что подтверждает целесообразность измерения перепада давления до и после фильтрующих устройств $\Delta P_{\text{цфу}}$ по датчикам 15 и 18. Результаты опытов также подтвердили правильность отбора давления в нижней части фильтрующего устройства.

На втором этапе была подтверждена правомерность разработанного уравнения (3) – (5) по определению геометрических параметров опорных гофрированных цилиндрических устройств из сетки, при которых не происходит деформация и разрушение фильтрующих устройств. Для проверки данных положений и проведения испытаний были изготовлены три комплекта одинаковых гофрированных фильтрующих устройства внешним диаметром $D_{\text{н}} = 120 \text{ мм}$ с высотой 200 мм.

Фильтрующие устройства поочередно устанавливались в корпус фильтра, установленный на испытательном стенде (Рисунок 6). Затем создавались различные условия эксплуатации и вариации входных параметров (Входное давление, расход газа). После стабилизации потока газа с помощью дозирующего устройства (поз. 9 Рисунок 6) в полость трубы подавались механические примеси (оксиды железа, песок) с приведенным размером, равным размеру фильтрующей сетки в свету - 80 мкм, фиксировались показания перепада давления, форма и размеры фильтрующих устройств через каждые 5 кПа. При достижении перепада давления предельного значения в 20 кПа, форма и размеры проверялись при увеличении перепада давления на каждые 0,5 кПа. По результатам испытаний построен график на проверку устойчивости каждого из трех образцов опорной гофрированной цилиндрической оболочки, приведенный на Рисунке 8.

Результаты испытаний показали, что все представленные образцы выдержали испытание и сохранили форму при перепаде давления, равном предельному теоретическому значению $\Delta P_{\text{пр}} = 20,0 \text{ кПа}$. Деформация (потеря устойчивости) всех трех экспериментальных образцов произошла в диапазоне 24,5 – 26,5 кПа, что выше теоретического значения предельного перепада давления $\Delta P_{\text{пр}}$, отраженного на графике Рисунка 8.

Хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных, равное 22,4 %, позволяет рекомендовать разработанные уравнения (3) – (5) для использования в проектной и эксплуатационной практике.

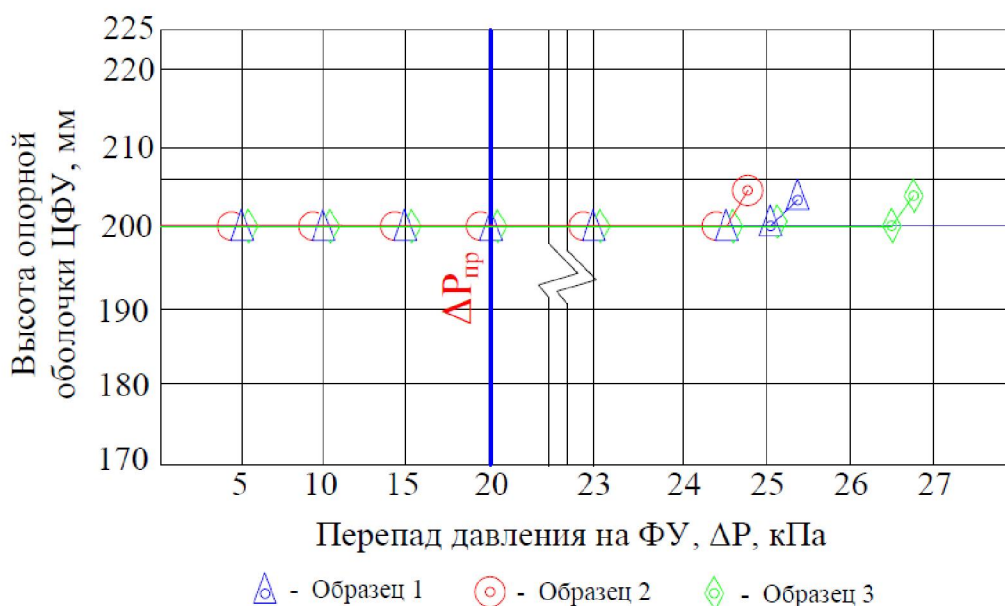


Рисунок 8 – Результаты опытов по проверке на прочность трех образцов гофрированных цилиндрических фильтрующих устройств

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен анализ существующих типов фильтрующих устройств по очистке газа от твердых примесей, устанавливаемых в пунктах редуцирования газа. Анализ показал, что в системах очистки газа использование фильтрующих устройств сетчатого типа является наиболее технически и экономически целесообразным по сравнению с тканевыми, зернистыми и волокнистыми.

Результаты анализа существующих конструкций газовых фильтров и применяемых сетчатых фильтрующих устройств показали высокие расходы на их обслуживание, значительную материалоемкость корпуса при недостаточной прочности, и низкую пропускную способность конструкции, а также низкую точность способа замера перепада давления на фильтрующих устройствах.

2. Разработан новый способ контроля перепада давления непосредственно на фильтрующих устройствах в газовых фильтрах путем установки датчиков до и после фильтрующих устройств в нижней их части, а также предложены зависимости перепада давления на газовом фильтре от места и способа его измерения, что позволяет повысить достоверность измерения перепада давления на цилиндрических фильтрующих устройствах на 50-70 % по сравнению с существующими конструкциями в которых, датчики перепада давления установлены на входном и выходном патрубках фильтра.

3. Предложены технические решения по конструкции гофрированного фильтрующего устройства, состоящей из трехслойной оболочки с однотипными продольными гофрами, и уточненные формулы для определения её оптимальных конструктивных и геометрических параметров, что позволяет обеспечить двукратный запас устойчивости и прочности фильтрующих устройств, устанавливаемых в пунктах редуцирования газа, и, как следствие,

повысить ресурс работы цилиндрических фильтрующих устройств до проведения очистки с 4320 до 8640 часов, за счет увеличения их прочности и устойчивости, по сравнению со стандартной гофрированной конструкцией. Разработан способ размещения нескольких фильтрующих устройств малой высоты, установленных один на другой, а также зависимости по обоснованию оптимального количества таких фильтрующих устройств, что позволяет обеспечить сокращение интегральных затрат в газовые фильтры, расположенные в пунктах редуцирования газа, в 1,42 раза по сравнению с существующими аналогами, в которых устанавливается только одно фильтрующее устройство большой высоты.

4. Изготовлена, испытана и внедрена серия газовых фильтров типа ФГ с фильтрующими устройствами, установленными один над другим, оснащенных гофрированной оболочкой и датчиками статического давления для контроля предельного перепада давления. Данные фильтры были внедрены на опасных производственных объектах ГГРП №60 в г. Волгограде и ГРП №67/8 в г. Воронеже.

Разработан и создан экспериментальный стенд, позволяющий проводить исследования вновь разрабатываемых газовых фильтров в условиях, приближенных к реальным, с моделированием входного давления, расхода среды и перепада давления.

В результате экспериментальных исследований были доказаны и подтверждены:

- некорректность определения перепада давления на входном и выходном патрубках и, следовательно, степень засорения фильтра, что указывает на целесообразность измерения перепада давления до и после фильтрующих устройств;

- правильность отбора давления в нижней части фильтрующего устройства;

- правомерность разработанных уравнений по определению геометрических параметров гофрированных цилиндрических устройств, прочности и устойчивости конструкции.

Основные результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:

Ведущие рецензируемые научные журналы и издания, входящие в перечень ВАК Минобрнауки России:

1. Усачев, А. П. Совершенствование методических подходов к замеру перепада давления на цилиндрических фильтрующих элементах современных газовых фильтров сетчатого типа / А. П. Усачев [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 1, Т. 13. – С. 131-136.

2. Усачев, А. П. Разработка принципа и математической модели сокращения интегральных затрат в цилиндрические, вертикально установленные, фильтрующие устройства / А. П. Усачев [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2016. – № 3, Т. 14. – С. 159-164.

3. Усачев, А. П. Разработка методических положений по предотвращению разрушения цилиндрических блоков фильтрующих устройств природного газа / А. П. Усачев [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2016. – № 3, Т. 14. – С. 152-158.

4. Усачев, А. П. Разработка принципов повышения эффективности газовых фильтрующих картриджей грубой и тонкой очистки большой пропускной способности / А.П. Усачев [и др.] // Газовая промышленность. – 2018. – Спецвып. № 2. – С. 14-22.

5. Усачев, А. П. Техничко-экономическое моделирование цилиндрических фильтрующих элементов предварительной и тонкой очистки на основе их размещения в одном корпусе установки газовой очистки / А. П. Усачев [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2018. – №2, Т. 16. – С. 114-122.

Технические объекты интеллектуальной собственности

6. Патент на полезную модель 158000 Российская Федерация, МПК:В01D 53/00. Установка грубой очистки природного газа от твердых частиц, располагаемая в помещении / Усачев А. П., Шурайц А. Л., Рулев А. В., Салин Д.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Гипрониигаз». – № 2014151034/05; заявл. 16.12.2014; опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35. – 7 с: ил.

7. Патент на полезную модель 157997 Российская Федерация, МПК:В01D 46/00. Установка грубой очистки природного газа с цилиндрическим фильтрующим элементом сетчатого типа / Усачев А. П., Шурайц А. Л., Рулев А. В., Салин Д.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Гипрониигаз». – № 2014151039/05; заявл. 16.12.2014; опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35. – 8 с.: ил.

8. Патент на полезную модель 166735 Российская Федерация, МПК:В01D 46/52. Устройство по предотвращению распространения обломков за пределы фильтрующего элемента природного газа / Усачев А. П., Шурайц А. Л., Рулев А. В., Салин Д.В., Усуев З.М.; заявитель и патентообладатель ОАО «Гипрониигаз». – № 2016116727/05; заявл. 27.04.2016; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 6 с: ил.

Другие статьи и материалы конференций

9. Шурайц, А. Л. Анализ существующей конструкции газового фильтра предварительной очистки с минимальной удельной металлоемкостью/ А. Л. Шурайц [и др.] // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во ИПТЭР, 2015. – С. 347-348.

10. Салин, Д. В. Предпосылки к разработке газового фильтра предварительной очистки с блоком вертикально расположенных фильтрующих цилиндрических элементов / Д. В. Салин [и др.] // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа: материалы науч.-практ. конф. – Уфа: Изд-во ИПТЭР, 2015. – С. 344-346.

11. Усачев, А. П. Разработка конструкции и определение геометрических параметров сетчатой гофрированной оболочки, предотвращающей разрушение фильтрующего элемента газовых цилиндрических фильтров / А. П. Усачев [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 1 (103). – С. 95-106.

12. Усачев, А. П. Принципы функционирования датчиков контроля предельного перепада давления, предупреждающих возникновение аварийных ситуаций на цилиндрических фильтрующих устройствах / А. П. Усачев [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 3 (105). – С. 160-171.

13. Усачев, А. П. Разработка принципов предотвращения деформации гофрированных фильтрующих устройств природного газа, оснащенных цилиндрическими опорными оболочками с продольными ребрами жесткости / А. П. Усачев [и др.] // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 3 (105). – С. 172-183.

14. СТО 03321549-047-2016. Рекомендации по повышению эффективности и безопасности цилиндрических газовых фильтрующих устройств, установленных один на другой с гофрированной поверхностью опорной оболочки для предотвращения их деформации и разрушения, оснащенных датчиками статического давления для контроля максимально допустимого и предельного перепадов давления с минимальной погрешностью

/ А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, Д.В. Салин, З.М. Усуев и др. – Саратов: ОАО «Гипрониигаз», 2016. – 52 с.

15. Усачев, А. П. Предпосылки к разработке конструкции фильтрующего элемента природного газа, исключаяющей его деформирование и разрушение / А. П. Усачев [и др.] // Тенденции развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: материалы науч.-практ. конф. – Саратов: Изд-во ФГБОУ «Саратовский ГАУ», 2016. – С. 262–265.

16. Усачев, А. П. Разработка опорной конструкции фильтрующего элемента природного газа, исключаяющей его деформирование и разрушение / А. П. Усачев [и др.] // Тенденции развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: материалы науч.-практ. конф. – Саратов: Изд-во ФГБОУ «Саратовский ГАУ», 2016. – С. 269-273.

17. Усачев, А. П. Основные принципы устройства и функционирования газовых цилиндрических фильтрующих устройств высокой пропускной способности / А. П. Усачев [и др.] // Региональная архитектура и строительство. –2018. – № 1. – С. 141-147.