РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ КАРТРИДЖЕЙ ГРУБОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ БОЛЬШОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

УДК 621.6.036

А.П. Усачев, д.т.н., проф., Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (Саратов, РФ), usachev-ap@mail.ru
А.Л. Шурайц, д.т.н., АО «Гипрониигаз» (Саратов, РФ), shuraits@niigaz.ru
А.В. Бирюков, к.т.н., АО «Гипрониигаз», biryukov@niigaz.ru
А.О. Хомутов, АО «Гипрониигаз», khomutov.anton@gmail.com
Д.В. Салин, АО «Гипрониигаз»

В работе газового оборудования, применяемого в современных головных пунктах редуцирования газа, одним из проблемных вопросов выступает повышение качества очистки газа от механических примесей. В статье рассмотрены основные принципы и этапы повышения эффективности цилиндрических фильтрующих картриджей грубой и тонкой очистки высокой пропускной способности.
Представлены новые технические решения: принцип снижения материалоемкости корпуса фильтров за счет оптимизации формы и разработки соответствующей конструкции цилиндрического фильтра; принцип повышения удельной пропускной способности на основе увеличения степени заполнения фильтрующих поверхностей посредством образования радиальных гофр; оценка засорения фильтра механическими примесями с использованием нового способа достоверного замера перепада давления на цилиндрическом фильтрующем картридже.
В целях снижения материалоемкости и капиталовложений в цилиндрический фильтр проведена оптимизация его формы, повышена степень заполнения внутреннего объема корпуса фильтрующей сеткой, разработаны принципы размещения цилиндрических фильтрующих картриджей грубой и тонкой очистки в одном корпусе. Для определения степени засорения фильтра механическими примесями разработан достоверный способ замера перепада давления непосредственно на цилиндрическом фильтрующем картридже.
Для апробации представленных решений был изготовлен и успешно испытан опытно-промышленный образец фильтрующего устройства, что позволило включить его в проекты строительства пунктов редуцирования газа высокой пропускной способности 500 м³/ч.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПРИНЦИП ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ, ДВУХСТУПЕНЧАТАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА, ФИЛЬТРУЮЩИЙ КАРТРИДЖ, ГРУБАЯ ОЧИСТКА, ТОНКАЯ ОЧИСТКА, ПРИРОДНЫЙ ГАЗ, МЕХАНИЧЕСКАЯ ПРИМЕСЬ.

Головные пункты редуцирования газа (ПРГ) являются важнейшими структурными элементами городских газораспределительных сетей, которые обеспечивают надежность функционирования основных потребителей газа, включая объекты жизнеобеспечения. В настоящее время успешно эксплуатируются головные ПРГ большой единичной мощности, проектирование и строительство которых осуществляло АО «Гипрониигаз», в Волгограде (500,0 тыс. м³/ч), Воронеже (200,0 тыс. м³/ч), Уфе (500,0 тыс. м³/ч) и ряде других населенных пунктов. Одним из проблемных вопросов при эксплуатации вышеуказанных объектов является низкое качество газа, подаваемого в сети газораспределения, в отношении очистки от механических примесей, что требует применения в ПРГ устройств двухступенчатой очистки газа, оснащенных цилиндрическими фильтрующими картриджами (ЦФК) грубой и тонкой очистки [1].

Газооборудование современного отечественного ПРГ включает двухступенчатые цилиндрические установки (ДЦУ) с фильтрами грубой и тонкой очистки газа основных и резервных линий редуцирования (рис. 1).

Usachev A.P., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Gagarin Saratov State Technical University (Saratov, Russian Federation), usachev-ap@mail.ru
Shurayts A.L., Doctor of Sciences (Engineering), Giproniigaz JSC (Saratov, Russian Federation), shuraits@niigaz.ru
Biryukov A.V., Candidate of Sciences (Engineering), Giproniigaz JSC, biryukov@niigaz.ru
Khomutov A.O., Giproniigaz JSC, khomutov.anton@gmail.com
Salin D.V., Giproniigaz JSC

Development of principles of improving the efficiency of gas filtering cartridges by primary and fine purification with high flow capacity

Improvement of the quality of gas purification from mechanical admixtures is one of the problematic issues in the work of gas equipment used in the modern gas reduction control units. The article considers the basic principles and stages of increasing the efficiency of cylindrical filter cartridges for primary and fine purification of high capacity.
New technical solutions are presented: principle of reducing the material consumption of the filter housing by optimizing the form and developing the corresponding design of a cylindrical filter; principle of increasing the specific throughput by increasing the degree of filling the filter surfaces by forming radial corrugations; evaluation of filter clogging with mechanical admixtures using a new method of actual measurement of the pressure drop across the cylindrical filter cartridge; new design for installation of cartridges of primary and fine purification in one housing to reduce the material consumption.
The form of the cylindrical filter was optimized in order to reduce the material consumption and investment in this unit.
The degree of filling the internal volume of the housing with a filtering mesh was improved, and the principles of installation of cylindrical filter cartridges for primary and fine purification in one housing were developed. The reliable method of measuring the pressure drop directly on a cylindrical filter cartridge was developed to determine the degree of filter clogging with mechanical admixtures.
The commercial prototype of the filtering device was manufactured and successfully tested, after that it was included in the projects of construction of gas reduction stations with a high flow capacity of 500 m^3/h.

KEYWORDS: EFFICIENCY IMPROVEMENT PRINCIPLE, TWO-STAGE CYLINDRICAL UNIT, FILTERING CARTRIDGE, PRIMARY PURIFICATION, FINE PURIFICATION, NATURAL GAS, MECHANICAL ADMIXTURE.

В технической литературе отсутствуют методические положения по повышению экономической и технической эффективности ДЦУ газовой очистки [2–4]. В связи с этим АО «Гипрониигаз» при проектировании и строительстве головных ПРГ уделяет большое внимание повышению пропускной способности и снижению металлоемкости ЦФК, а также сокращению строительного объема зданий и сооружений для их размещения.

Анализ существующих установок из фильтров грубой и тонкой очистки газа выявил ряд следующих недостатков:

– высокая материалоемкость и капиталовложения в фильтры вследствие их нерациональной формы, а также в ограждающие строительные конструкции для их размещения;

– низкая степень заполнения внутреннего объема корпуса фильтрующей сеткой и, как следствие, его высокие металлоемкость и капиталовложения; низкая степень улавливания механических примесей фильтрующими картриджами грубой очистки, обусловленная большим (0,2–0,5 мм) размером ячейки применяемых в них сеток [5];

– нарушение режима очистки фильтрующих поверхностей от механических примесей из-за отсутствия способа определения перепада давления на ЦФК, указывающего достоверную степень засорения; в выпускаемых промышленностью цилиндрических фильтрах для очистки природного газа можно замерить только перепад давления между их входным и выходным патрубками, что приводит к значительной погрешности по сравнению с замером непосредственно на ЦФК и, следовательно, несвоевременности удаления механических примесей с их фильтрующих поверхностей;

– высокая материалоемкость вследствие размещения ЦФК грубой и тонкой очистки в отдельных корпусах *4*, *5*, *9*, *10* (см. рис. 1), эксплуатируемых при высоком давлении и имеющих в этом случае большие толщины соединительных фланцев и стенок цилиндрических обечаек; для размещения одного из фильтров двухступенчатых установок очистки требуются дополнительные площади, а также затраты на отопление и вентиляцию отчуждаемого объема.

В целях устранения имеющихся недостатков АО «Гипрониигаз» был предложен ряд принципов, на основе которых разработаны технические решения и методические положения.

ПРИНЦИП СНИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ КОРПУСА

Сформулирован принцип снижения материалоемкости корпуса фильтров на основе оптимизации их формы.

На первом этапе технического совершенствования фильтров проведена оптимизация формы

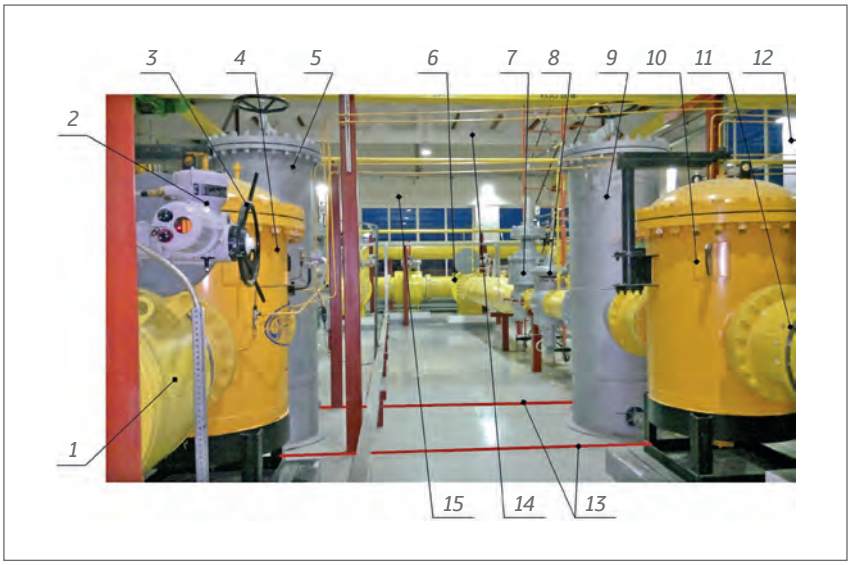


Рис. 1. Газооборудование современного отечественного ПРГ, включающего двухступенчатые цилиндрические установки с фильтрами грубой и тонкой очистки газа основных и резервных линий редуцирования: *1* – кран шаровой с электрическим (*2*) и ручным (*3*) приводами на входе в основную линию редуцирования; *4*, *5* – фильтры грубой и тонкой очистки, расположенные на основной линии редуцирования; *6*, *11* – краны шаровые с электрическим и ручным приводами на входе и выходе резервной линии редуцирования; *7*, *8* – рабочий и резервный регуляторы давления газа, расположенные на резервной линии редуцирования; *9*, *10* – фильтры тонкой и грубой очистки, входящие в состав резервной линии редуцирования; *12* – окно; *13* – линии красного цвета, ограничивающие площадь напольной конструкции, необходимой для размещения одного из фильтров двухступенчатых установок очистки; *14* – потолочные конструкции; *15* – стена

Fig. 1. Gas equipment of modern domestic gas reduction control unit including two-stage cylindrical units with filters for primary and fine gas purification of main and reserve reduction lines: *1* – ball valve with electric (*2*) and manual (*3*) drives at the inlet to the main reduction line; *4*, *5* – primary and fine purification filters located on the main reduction line; *6*, *11* – ball valves with electric and manual drives at the inlet and outlet of the reserve reduction line; *7*, *8* – working and reserve gas pressure regulators located on the reserve reduction line; *9*, *10* – fine and primary purification filters included in the reserve reduction line; *12* – window; *13* – red lines limiting the area of the floor structure necessary for the placement of one of the filters of two-stage purification plants; *14* – ceiling structures; *15* – wall

их корпуса *1* (рис. 2), за счет которой достигаются минимальные металлоемкость и капиталовложения. Результаты проведенных исследований [6] показывают, что оптимальное отношение высоты *H* корпуса *1* к его диаметру *D*, при которых достигаются минимальные металлоемкость и капиталовложения, составляет $(H/D)_{opt} = 4{,}0$. В этом случае высота ЦФК в виде одного неразборного изделия $H_{фк}$ составит 65 % от высоты *H* корпуса *1* фильтра. Для извлечения из корпуса *1* такого ЦФК при проведении очистки от механических примесей необходимо предусматривать дополнительную высоту помещения, равную высоте ЦФК. В результате увеличиваются площадь наружных стен и расход тепловой энергии на отопление этой части помещения ПРГ. При этом чем больше площадь пола для размещения другого газового оборудования, расположенного совместно с фильтром в помещении ПРГ, тем больше периметр и площадь наружных стен высотой, равной $H_{фк}$, а также тепловые потери через указанную площадь. В целях сокращения затрат на ЦФК и ограждающие конструкции помещения предложен и защищен патентом принцип установки: вместо одного неразборного ЦФК высотой $H_{фк}$ используется несколько (их число $n_{фк}$) картриджей меньшей высоты, установленных параллельно, один на другом (см. рис. 2), с высотой каждого из них, равной $h_{фк} = H_{фк}/n_{фк}$ [7].

Увеличение количества вертикально установленных ЦФК позволяет производить их демонтаж, извлекая по одному и поднимая над верхней отметкой фильтра только на высоту $h_{фк}$ (см. рис. 2). Это, в свою очередь, позволяет уменьшить высоту наружных стен до величины, необходимой для извлечения ряда ЦФК, что приводит к снижению материалоемкости и капитальных вложений.

Вместе с тем увеличение числа вертикально установленных ЦФК приводит к росту капитальных вложений в их изготовление, поскольку вместо одного ЦФК производится $n_{фк}$ фильтрующих картриджей. В этом случае увеличивается число кольцеобразных оснований и крышек для крепления фильтрующей и опорных сеток, расход материалов, например эпоксидной заливки для герметичного соединения нижних и верхних краев сеток, соответственно увеличиваются капитальные вложения в их сборку, а также в изготовление, монтаж и демонтаж струбцины, соединяющей $n_{фк}$ картриджей в единый разборный блок, обеспечивающий необходимую прочность и устойчивость.

В целях определения оптимального числа ЦФК, которому соответствуют минимальные дополнительные интегральные затраты на ЦФК и наружные стены помещения, разработана математическая модель [8].

В соответствии с приведенной моделью выполнены расчеты по определению оптимального числа ЦФК для расположенного в помещении ПРГ фильтра с диаметром входного и выходного патрубков 350 мм. Результаты вычислений показывают, что оптимальное число ЦФК, размещаемое в его внутреннем объеме, составляет $n_{фк\ opt} = 3{,}0$. При этом дополнитель-

ные расчеты показывают, что с уменьшением диаметра входного и выходного патрубков фильтра значение $n_{фк\ opt}$ уменьшается.

Общий вид предложенных конструкций цилиндрического фильтра оптимальной формы и ЦФК *8*, *10* и *11* сетчатого типа, изготовленных АО «Гипрониигаз», с диаметром входного и выходного патрубков 350 мм, приведен на рис. 3.

Применение полученных результатов по определению оптимальной формы корпуса и использование принципа установки нескольких ЦФК малой высоты числом $n_{фк}$, установленных один на другой [7], для фильтра пропускной способностью 92 тыс. м^3/ч позволяет сократить материалоемкость и капиталовложения в 1,28 раза по сравнению с широко применяемыми фильтрами ФГС-СН-500 с такой же пропускной способностью.

ПРИНЦИП ПОВЫШЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

Разработан принцип повышения удельной пропускной способности на основе повышения степени заполнения фильтрующих поверхностей в единице объема корпуса фильтра.

На втором этапе технического совершенствования фильтра предложен принцип образования радиальных гофр *4* диаметром $D_н$ (рис. 4) на фильтрующих поверхностях полого цилиндра *3* диаметром $D_в$.

При этом на боковых сторонах гофр *4* формируются дополнительные продольные складки *5*. Фильтрующий цилиндр *3* герметично соединен с выходным штуцером *6* корпуса *2*. Предложенный принцип и созданные на его основе технические решения защищены патентом [9].

Предложенная конструкция гофрированного ЦФК позволяет увеличить пропускную способность по сравнению с обычным ЦФК с гладкой фильтрующей

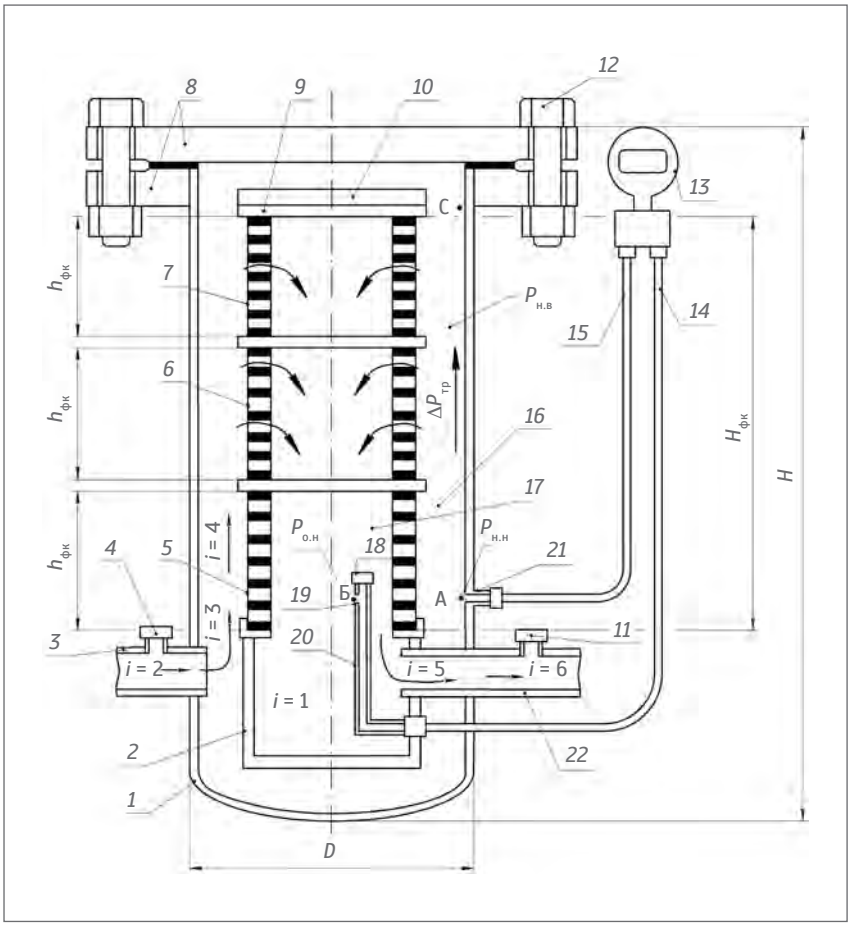
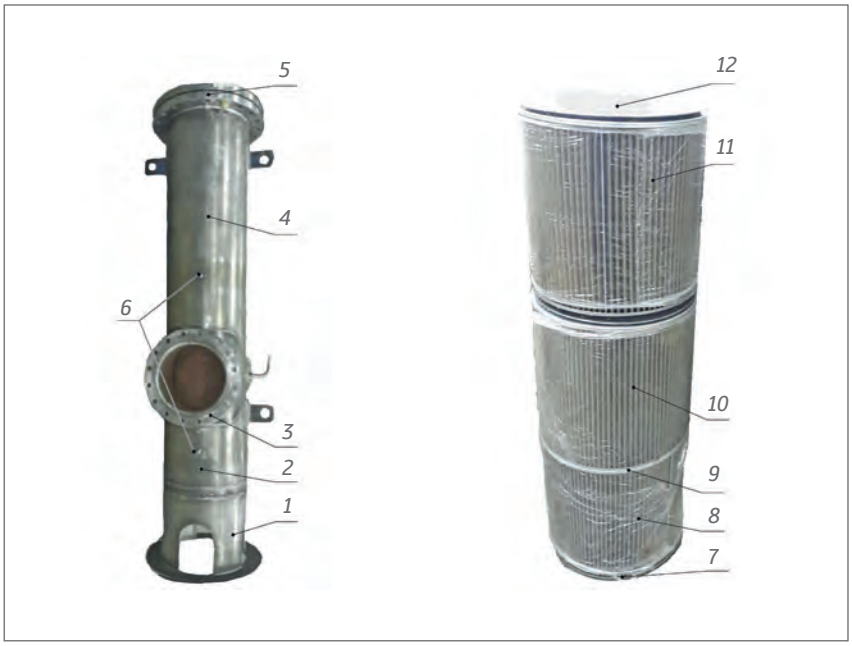


Рис. 2. Схема фильтра сетчатого типа с блоком из нескольких ЦФК, установленных параллельно один на другой, с замером перепада давления непосредственно на цилиндрических фильтрующих картриджах: *1* – цельносварной корпус; *2* – стакан для установки на нем ЦФК; *3*, *22* – входной и выходной патрубки фильтра; *4*, *11* – места установки датчиков для замера перепада давления на фильтре между входным и выходным патрубками *3* и *22*; *5–7* – нижний, средний и верхний цилиндрические фильтрующие картриджи сетчатого типа соответственно, установленные один на другой; *8* – крышка и ответный фланец корпуса фильтра; *9* – уплотнительная прокладка; *10* – крышка для блока ЦФК; *12* – болтовое соединение; *13* – дифференциальный манометр-преобразователь для замера перепада давления на ЦФК; *14*, *15* – импульсные трубки для замера перепада давления на ЦФК; *16* – кольцевое пространство между фильтрующими картриджами *5–7* и корпусом фильтра *1*; *17* – внутреннее пространство цилиндрических фильтрующих картриджей *5–7*; *18* – герметичная заглушка; *19* – отверстие для замера статического давления очищенного газа; *20* – вертикальная трубка-датчик, снабженная отверстием *19* для замера статического давления очищенного газа во внутреннем пространстве ЦФК *17*; *21* – трубка-датчик для замера статического давления неочищенного газа в кольцевом пространстве *16*

Fig. 2. Diagram of a mesh filter with a block of several cylindrical filter cartridges installed parallel, one upon the other, with a measurement of the pressure drop directly on the cylindrical filter cartridges: *1* – all-welded housing; *2* – glass for the installation of cylindrical filter cartridge on it; *3*, *22* – inlet and outlet filter tubes; *4*, *11* – the locations of the sensors for measuring the pressure drop on the filter between the inlet and outlet tubes *3* and *22*; *5–7* – the lower, middle and upper cylindrical filter cartridges of the mesh type, respectively, installed one upon the other; 8 – cover and counter flange of filter housing; *9* – sealing; *10* – cover for the cylindrical filter cartridge block; *12* – bolted joint; *13* – differential pressure gauges for measuring differential pressure on the cylindrical filter cartridge; *14*, *15* – pulse tubes for measuring the pressure drop on the cylindrical filter cartridge; *16* – annular space between the filter cartridges *5–7* and the filter housing *1*; *17* – inner space of the cylindrical filter cartridges *5–7*; *18* – pressure plug; *19* – hole for measuring static pressure of purified gas; *20* – vertical sensor tube provided with an opening *19* for measuring the static pressure of the purified gas in the interior of the cylindrical filter cartridge *17*; *21* – tube sensor for measuring the static pressure of the raw gas in the annular space *16*



а) a) б) b)

Рис. 3. Оборудование, выпускаемое АО «Гипрониигаз»: а) общий вид цилиндрического фильтра оптимальной формы с диаметром входного и выходного патрубков 350 мм и размещенным внутри него блоком из трех ЦФК: *1* – опора фильтра; *2* – нижняя часть корпуса фильтра для сбора механических примесей; *3* – выходной патрубок с фланцем; *4* – верхняя часть корпуса с размещенными внутри него тремя ЦФК из сетки один на другом; *5* – фланец и крышка корпуса; *6* – штуцеры для присоединения датчиков перепада давления до и после ЦФК; б) общий вид блока из трех сетчатых ЦФК, установленных один на другой: *7* – кольцеобразная нижняя пластина каждого из фильтрующих гофрированных картриджей *8*, *10*, *11*, выполняющая функцию поперечного ребра жесткости; *8*, *10*, *11* – нижний, средний и верхний фильтрующие картриджи соответственно, каждый из которых имеет в своем составе защитную и опорную оболочки; *9* – кольцеобразная верхняя пластина каждого из фильтрующих картриджей *8*, *10*, *11*, выполняющая функцию поперечного ребра жесткости; *12* – крышка
Fig. 3. Equipment manufactured by Giproniigaz JSC: a) main view of the cylindrical filter of optimal form with a diameter of inlet and outlet tubes of 350 mm and with a block of three cylindrical filter cartridges placed inside the filter: *1* – filter support; *2* – lower part of the filter housing for collecting mechanical impurities; *3* – outlet tube with flange; *4* – upper part of the housing with three cylindrical mesh filter cartridges placed inside it, one upon the other; *5* – flange and cover of the housing; *6* – fittings for connecting the drop pressure sensors before and after the cylindrical filter cartridges; b) main view of a block of three mesh cylindrical filter cartridges installed one upon the other: *7* – annular lower plate of each of the filtering ribbed cartridges *8*, *10*, *11*, which performs the function of a transverse stiffener; *8*, *10*, *11* – lower, middle and upper filter cartridges, respectively, each of which has a protective and support shells; *9* – annular upper plate of each of the filter cartridges *8*, *10*, *11*, which serves as a transverse stiffener; *12* – cover

цилиндрической поверхностью в 5,5 раза.

В целях повышения качества грубой очистки был проанализирован опыт эксплуатации газорегулирующего и измерительного оборудования, который показал, что увеличение размеров частиц механических примесей свыше 0,1 мм приводит к повышению погрешности измерений и выходу из строя измерительных комплексов и газовых счетчиков, а также эрозии уплотнительных поверхностей клапанов, снижающей уровень их герметичности ниже класса А по ГОСТ 9544–2015 [10].

Для приведения в соответствие с требованиями и техническими характеристиками существующих сетчатых фильтров было разработано предложение [11] о применении сеток с размером ячейки не более 0,08 мм [12]. При этом гофрированные сетки с размером ячейки 0,08 мм и толщиной 0,055 мм не могут сохранять постоянную форму под воздействием перепада давления, повышающегося при их засорении механическими примесями.

Повышение устойчивости и прочности тонкой гофрированной фильтрующей сетки *5* (рис. 5) достигается путем образования на ее боковых цилиндрических поверхностях наружной защитной оболочки *4* и внутренней опорной оболочки *6* из металлической утолщенной сетки параллельных их оси однотипных продольных гофр, равномерно распределенных по всей их цилиндрической поверхности. При этом наружная *4* и внутренняя *6* оболочки расположены друг относительно друга на расстоянии, заданном толщиной фильтрующей сетки *5*, образуя вместе с ней трехслойную гофрированную структуру [13].

Результаты расчетов, проведенных согласно [14], на прочность и устойчивость продольных гофр в опорной оболочке *6*, выполняющих функцию продольных ребер, показывают, что для блока из трех ЦФК, установленных один на другой, при высоте одного ЦФК 460 мм и толщине опорной сетки *6*, равной 1,1 мм, обеспечивается необходимая прочность при максимально допустимой величине перепада давления на ЦФК.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЗАСОРЕНИЯ ФИЛЬТРА

Проведено определение степени засорения фильтра механическими примесями на основе предложенного способа достоверного замера перепада давления непосредственно на ЦФК.

На третьем этапе предложены принципы достоверного замера максимально допустимого перепада давления $\Delta P_{мд}$ непосредственно на ЦФК для определения степени засорения, при которой необходимо производить очистку от механических примесей. В настоящее время отсутствуют

способы достоверного замера перепада давления на ЦФК.

В целях устранения указанного недостатка обосновано место установки датчиков перепада давления путем анализа потерь давления газа [15] при его течении вдоль блока из нескольких вертикально установленных один на другой фильтрующих картриджей *5*, *6* и *7* (см. рис. 2). Было показано, что поток газа, направленный вдоль блока фильтрующих картриджей *5*, *6* и *7* снизу вверх, приводит к снижению давления неочищенного газа в верхних частях кольцевого пространства *16* в месте расположения ЦФК *7*, в отличие от нижнего ЦФК *5*, вследствие газодинамических потерь.

Вследствие этого давление неочищенного газа $P_{н.н}$ в нижней части (точка А на рис. 2) фильтрующего картриджа *5* будет всегда больше, чем давление $P_{н.в}$ в верхней (точка С) в месте расположения ЦФК *7*, т. е. $P_{н.н} > P_{н.в}$ на величину газодинамических потерь на трение $\Delta P_{тр}$ на участке кольцевого пространства *16*. В этом случае более высокое значение перепада давления между неочищенным и очищенным газом на фильтрующем картридже в точке А по сравнению с точкой С ($P_{н.н} > P_{н.в}$) обусловливает пропорционально более высокое количество протекающего неочищенного газа, а значит, и большее количество твердых частиц, оседающих в нижней части ЦФК *5*, и, как следствие, бóльшую степень засоренности его фильтрующей сетки.

Отсюда следует, что замер статических давлений в нижней части фильтрующего картриджа *5* в точках А и Б покажет более высокое значение перепада давления на ЦФК, чем в верхней его части в месте расположения ЦФК *7*.

При этом значение перепада давлений $\Delta P_{мд}$ в нижней части фильтрующего картриджа *5* будет достигнуто в более ранний период по сравнению с верхним картриджем *7*. Таким образом, замер перепада давлений в нижней

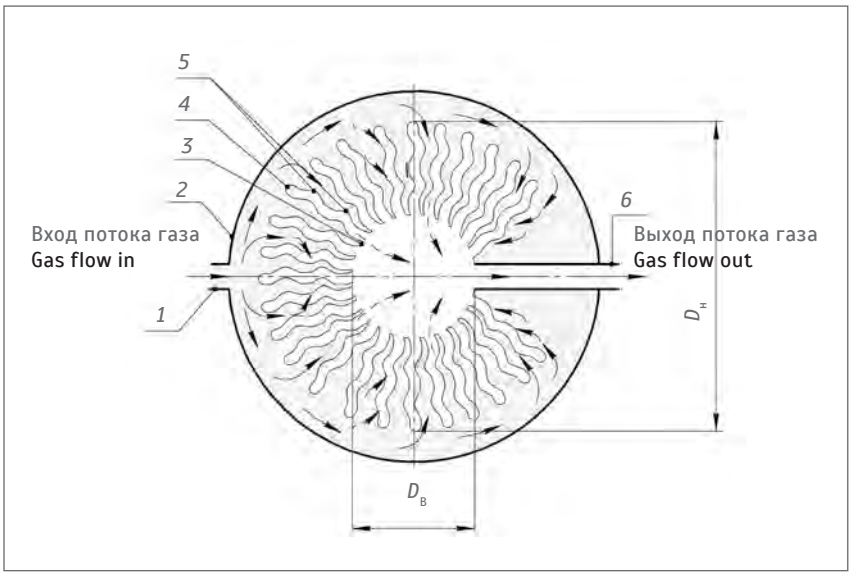


Рис. 4. Схема ЦФК, оснащенного основными гофрами и дополнительными фильтрующими складками: *1* – входной штуцер; *2* – корпус фильтра; *3* – полый цилиндр из металлической сетки; *4* – радиальные фильтрующие гофры из плетеной металлической сетки; *5* – дополнительные продольные фильтрующие складки; *6* – выходной штуцер

Fig. 4. Scheme of the cylindrical filter cartridge equipped with basic corrugations and additional filtering folds: *1* – inlet choke; *2* – filter housing; *3* – hollow cylinder made of metal mesh; *4* – radial filtering corrugations made of woven metal mesh; *5* – additional longitudinal filtering folds; *6* – outlet choke

части фильтрующего картриджа *5*, наиболее засоренной твердыми частицами, дает возможность максимально раннего получения сигнала на диспетчерском пульте и обеспечивает временной запас для технического персонала по своевременному отключению фильтра в целях очистки его от механических примесей.

По результатам анализа, приведенного в [15], разработано устройство, обеспечивающее минимальную погрешность при замере перепада давления непосредственно на фильтрующем картридже. Схема устройства, в соответствии с предлагаемым способом замера перепада давления на ЦФК [16] между датчиками *21* и *20*, приведена на рис. 2. Согласно предлагаемому способу замера перепада давления на ЦФК (см. рис. 2) штуцер-датчик *21* для отбора давления неочищенного газа устанавливается в нижней части корпуса *1* и соединен своим отверстием с внутренним кольцевым пространством *16*, что позволяет газу по импульсной трубке *15* от штуцера *21* поступать к дифференциальному манометру *13* для измерения и регистрации статического давления $P_{н.н}$ в точке А.

Узел для отбора давления очищенного газа выполнен в виде вертикального датчика давления *20*. При этом импульсная трубка *14* к датчику *20* герметично проходит через стенку корпуса *1*, кольцевое пространство *16* и входит во внутреннее пространство *17* внутри ЦФК *5* таким образом, чтобы отверстие *19* датчика *20* было расположено на уровне размещения входа датчика *21* для замера перепада давления неочищенного газа. Это отверстие должно быть расположено в боковой поверхности датчика *20* в целях замера статического давления $P_{о.н}$. Верхний конец датчика *20* герметично закрыт заглушкой *18*. Таким образом, датчики *21* и *20* измеряют разность статических давлений неочищенного и очищенного газа до и после ЦФК *5*, т. е. перепад давления на этом ЦФК. Предлагаемый принцип и разработанное на

его основе техническое решение защищены патентом на полезную модель [16].

Применение предложенного способа замера перепада давления непосредственно на ЦФК позволяет уменьшить погрешность его величины в 1,4–1,9 раза по сравнению с существующим аналогом, когда перепад давления измеряется на входном и выходном патрубках 3 и 22 цилиндрического фильтра.

ПРИНЦИП СНИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ ЦФК В ОДНОМ КОРПУСЕ

На четвертом этапе технического совершенствования предложен принцип сокращения материалоемкости путем размещения ЦФК грубой и тонкой очистки в одном корпусе.

В литературе [2–5] отсутствуют методические положения по компактному и малозатратному устройству ДЦУ газовой очистки. В связи с этим предложен новый принцип размещения во внутреннем объеме одного корпуса *2* (рис. 6) коаксиально установленных ЦФК, один внутри другого, грубой очистки *3* и *5* из сетки и тонкой очистки *4* и *6* из волокнистого материала, находящихся на минимально допустимом расстоянии δ_{min}, при котором сетка фильтрующих картриджей грубой очистки *3* и *5* в местах сближения с ЦФК тонкой очистки *4* и *6* не засоряется интенсивнее, чем на участках, расположенных на бóльших расстояниях, и, как следствие, не происходит увеличения перепада давления между фильтрующими слоями грубой *3* и *5* и тонкой *4* и *6* очистки.

В соответствии с предлагаемым принципом разработана конструкция ДЦУ, защищенная патентом на полезную модель [17].

В целях выявления значения δ_{min}, согласно патенту [17], в Научно-производственном центре АО «Гипрониигаз» было проведено испытание газового фильтрующего устройства, результаты которого показывают, что при увеличении расстояния δ между фильтрующими слоями грубой и тонкой очистки до минимального значения, равного δ_{min} = 5,6 мм, величина перепада давления между ними прекращает уменьшаться. Это свидетельствует о том, что при δ_{min} = 5,6 мм и выше засорение сетки грубой очистки осуществляется так же, как и одиночно расположенной сетки, и газодинамическое влияние слоя тонкой очистки уже не ощущается.

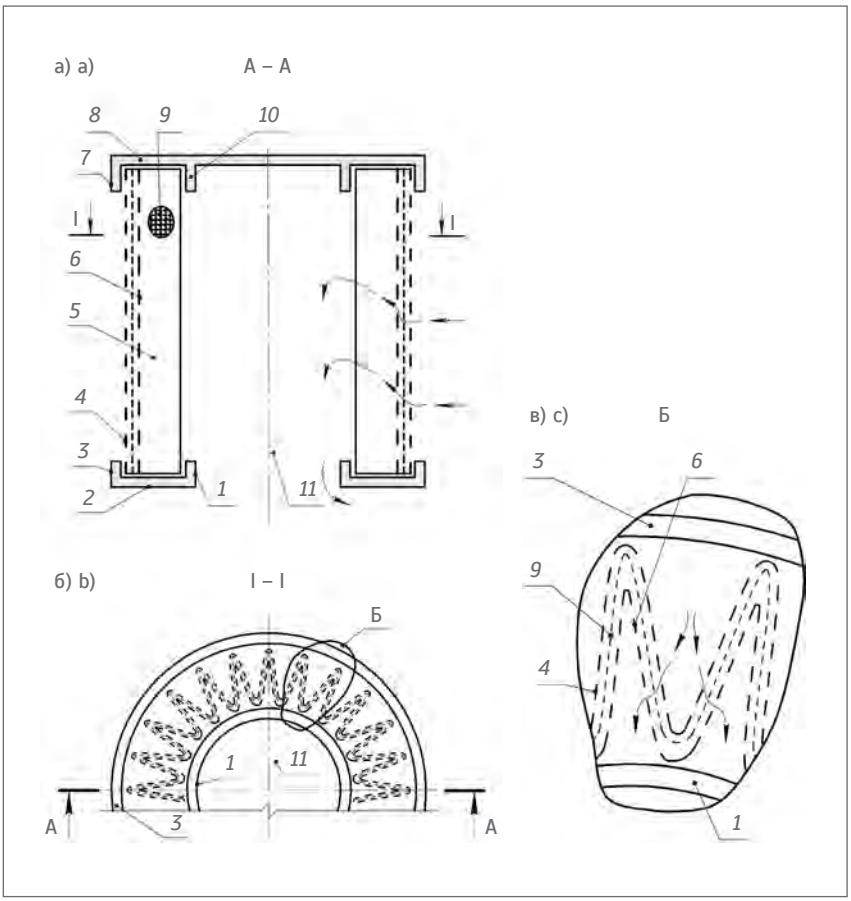


Рис. 5. Схема конструкции, предотвращающей деформацию ЦФК и распространение его обломков за пределы газового фильтра: *1, 3* – внутренняя и наружная кольцеобразные стенки основания; *2* – основание; *4* – наружная цилиндрическая защитная оболочка из утолщенной сетки; *5* – фильтрующая гофрированная поверхность; *6* – внутренняя цилиндрическая гофрированная опорная оболочка из утолщенной сетки; *7, 10* – внутренняя и наружная кольцеобразные стенки крышки; *8* – крышка; *9* – ячейки ЦФК *5*; *11* – отверстие в основании *2* для выхода очищенного газа

Fig. 5. Scheme of the construction preventing deformation of the cylindrical filter cartridge and the spread of its debris beyond the gas filter: *1, 3* – inner and outer annular walls of the base; *2* – base; *4* – outer cylindrical protective shell made of thickened mesh; *5* – filtering corrugated surface; *6* – inner cylindrical corrugated support shell made of thickened mesh; *7, 10* – inner and outer annular walls of the cover; *8* – cover; *9* – cells of the cylindrical filter cartridge *5*; *11* – hole in the base *2* for the outlet of the purified gas

В целях внедрения предлагаемых принципов повышения эффективности газовых ЦФК грубой и тонкой очистки высокой пропускной способности [6, 7, 9, 13, 16, 17] был изготовлен и испытан опытно-промышленный образец ДЦУ. Положительные результаты испытаний позволили включить предлагаемую конструкцию в состав подготовленного к строительству головного ПРГ пропускной способностью 500 тыс. м^3/ч.

Таким образом, в статье рассмотрены несколько этапов техниче-

ской эволюции установок очистки природного газа, направленных на повышение эффективности газовых ЦФК грубой и тонкой очистки большой пропускной способности.

ВЫВОДЫ

Определено оптимальное отношение высоты H корпуса цилиндрического фильтра к его диаметру D, составляющее $(H/D)_{opt} = 4{,}0$ (см. рис. 2), при котором достигаются минимальные металлоемкость и капиталовложения. Для извлечения из корпуса фильтрующего картриджа, составляющего в этом случае 65 % от высоты H корпуса фильтра, при проведении очистки от механических примесей необходимо предусматривать дополнительную высоту помещения, равную величине ЦФК.

В целях сокращения затрат на ЦФК и наружные стены помещения предложен и защищен патентом принцип установки: вместо одного неразборного ЦФК высотой $H_{фк}$ блок из нескольких картриджей меньшей высоты числом $n_{фк}$, установленных параллельно, один на другой (см. рис. 2), с высотой каждого из них, равной $h_{фк} = H_{фк}/n_{фк}$ [7]. Результаты расчетов показали, что оптимальное число ЦФК, размещаемое в его внутреннем объеме, составляет $n_{фк\ opt} = 3{,}0$.

В целях увеличения удельной пропускной способности предложен принцип повышения степени заполнения фильтрующих поверхностей в единице объема корпуса фильтра путем образования радиальных гофр с формированием на их боковых сторонах дополнительных продольных складок [9].

Повышение устойчивости и предотвращение деформаций тонкой гофрированной фильтрующей сетки достигается путем формирования на ее боковых поверхностях наружной и внутренней цилиндрических оболочек, выполненных из металлической утолщенной сетки (см. рис. 5) однотипных продольных гофр, которые образуют вместе с фильтрующей сеткой трехслойную гофрированную структуру [9].

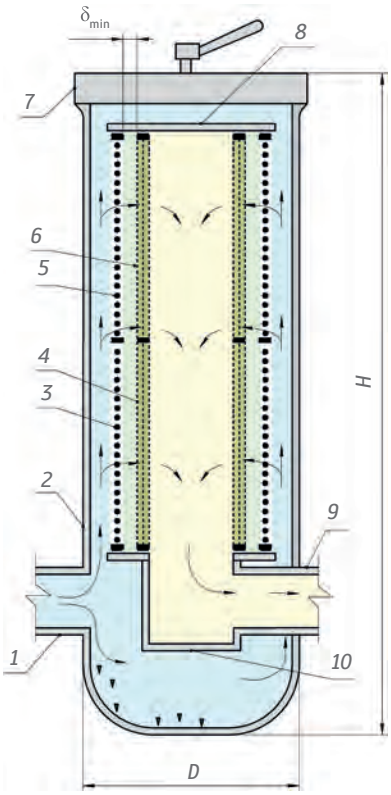


Рис. 6. Схема ДЦУ с ЦФК предварительной и тонкой очистки в одном корпусе: *1*, *9* – входной и выходной патрубки; *2* – цилиндрический корпус; *3*, *5* – блок из двух вертикально установленных ЦФК грубой очистки; *4*, *6* – блок из двух вертикально установленных ЦФК тонкой очистки; *7* – крышка фильтра; *8* – крышка для ЦФК грубой *5* и тонкой *6* очистки; *10* – стакан
Fig. 6. Scheme of two-stage cylindrical unit with primary and fine purification in one housing: *1*, *9* – inlet and outlet tubes; *2* – cylindrical housing; *3*, *5* – block of two vertically installed cylindrical filter cartridges of primary purification; *4*, *6* – block of two vertically installed thin-walled cylindrical filter cartridges; *7* – the filter cover; *8* – cover for the cylindrical filter cartridges of primary *5* and fine *6* purification; *10* – glass

Выявлено, что в нижней части блока фильтрующих картриджей в процессе фильтрации будет оседать всегда большее количество твердых частиц по сравнению с его верхней частью. Это обусловлено тем, что давление поднимающегося вверх неочищенного газа $P_{н.н}$ в нижней части блока фильтрующих картриджей будет всегда больше, чем в его верхней части $P_{н.в}$, на величину потерь давления на трение. Отсюда следует, что замер перепада давления в нижней части блока фильтрующих картриджей, наиболее засоренной твердыми частицами, дает возможность более раннего получения сигнала на диспетчерском пульте и обеспечивает временной запас для технического персонала по своевременному отключению фильтра в целях очистки его ЦФК от загрязнений.

Предложена конструкция узла замера перепада давления на ЦФК, когда датчик давления очищенного газа устанавливается в нижней части внутреннего объема ЦФК так, чтобы его отверстие для соединения с внутренним пространством ЦФК было расположено в его боковой поверхности на той же отметке, что и отверстие датчика давления неочищенного газа [16].

Предложен новый принцип размещения во внутреннем объеме корпуса фильтра двух коаксиально расположенных, один внутри другого, ЦФК грубой и тонкой очистки, находящихся на экспериментально установленном минимально допустимом расстоянии δ_{min} = 5,6 мм, при котором сетка фильтрующего картриджа грубой очистки в местах сближения с ЦФК тонкой очистки не засоряется интенсивнее, чем на участках, расположенных на бóльших расстояниях, и, как следствие, не происходит увеличения перепада давления между фильтрующими слоями грубой и тонкой очистки [17].

Результаты технико-экономического обоснования показывают, что значение интегральных удельных затрат в предлагаемую конструкцию ДЦУ в среднем в 1,65 раза меньше в сравнении с существующим аналогом, когда ЦФК грубой и тонкой очистки размещаются в отдельных корпусах. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 5542–2014. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 10 с.
2. Mokhatab S., Poe W.A. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. Waltham: Elsevier, Gulf Professional Publishing, 2012. 802 p.
3. Guo B., Ghalambor A. Natural Gas Engineering Handbook. Houston: Gulf Publishing Company, 2012. 472 p.
4. Sutherland K. Filters and Filtration Handbook. Oxford: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2008. 536 p.
5. Карякин Е.А., Багров П.Н., Брук Л.К. и др. Промышленное газовое оборудование. Саратов: Газовик, 2013. 1280 с.
6. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Густов С.В., Шерстюк П.В. Разработка математической модели оптимизации формы фильтров, размещаемых в шкафных газораспределительных пунктах // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2010. № 4. С. 145–155.
7. Патент № 158000 РФ. Установка грубой очистки природного газа от твердых частиц, располагаемая в помещении / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Рулев, Д.В. Салин. Заявл. 16.12.2014, опубл. 20.12.2015.
8. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Салин Д.В., Усуев З.М. Разработка принципа и математической модели сокращения интегральных затрат в цилиндрические вертикально установленные фильтрующие устройства // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 3. С. 159–164.
9. Патент № 116365 РФ. Установка очистки природного газа от твердых частиц / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, С.В. Густов и др. Заявл. 21.11.2011, опубл. 27.05.2012.
10. ГОСТ 9544–2015. Арматура трубопроводная. Нормы герметичности затворов. М.: Стандартинформ, 2015. 74 с.
11. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Густов С.В., Шерстюк П.В. Обоснование размеров ячейки сетки фильтрующих элементов систем защиты, предотвращающих попадание твердых частиц в газорегуляторные пункты, узлы учета и газоиспользующие приборы // Нефегазовое дело. 2010. Т. 8. № 2. С. 77–81.
12. ГОСТ 6613–86. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. 12 с.
13. Патент № 166735 РФ. Устройство по предотвращению распространения обломков за пределы фильтрующего элемента природного газа / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Рулев и др. Заявл. 27.04.2016. опубл. 10.12.2016.
14. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Салин Д.В., Усуев З.М. Разработка принципов предотвращения деформации гофрированных фильтрующих устройств природного газа, оснащенных цилиндрическими опорными оболочками с продольными ребрами жесткости // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 3. С. 172–183.
15. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Салин Д.В., Даньшев А.Е. Совершенствование методических подходов к замеру перепада давления на цилиндрических фильтрующих элементах современных газовых фильтров сетчатого типа // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13. № 1. С. 131–136.
16. Патент № 157997 РФ. Установка грубой очистки природного газа с цилиндрическим фильтрующим элементом сетчатого типа / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Рулев, Д.В. Салин. Заявл. 16.12.2014, опубл. 20.12.2015.
17. Патент № 174446U1 RU. Устройство для очистки от твердых частиц природного газа высокого давления / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, А.В. Рулев и др. Заявл. 06.04.2017, опубл. 13.10.2017.

REFERENCES

1. State Standard GOST 5542–2014. Natural Fuel Gases for Commercial and Domestic Use. Specifications. Moscow, Standartinform, 2015, 10 p. (In Russian)
2. Mokhatab S., Poe W.A. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. Waltham, Elsevier, Gulf Professional Publishing, 2012, 802 p.
3. Guo B., Ghalambor A. Natural Gas Engineering Handbook. Houston, Gulf Publishing Company, 2012, 472 p.
4. Sutherland K. Filters and Filtration Handbook. Oxford, Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2008, 536 p.
5. Karyakin E.A., Bagrov P.N., Brook L.K. Industrial Gas Equipment. Saratov, Gazovik, 2013, 1280 p.
6. Usachev A.P., Shurayts A.L., Gustov S.V., Sherstyuk P.V. Development of Mathematical Model for Optimizing the Form of Filters Placed in the Cabinet Gas Distribution Control Units. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduknov = Problems of Collecting, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products, 2010, No. 4, P. 145–155. (In Russian)
7. Patent No. 158000 RF. Indoors Installation of Primary Purification of Natural Gas from Solid Particles / A.P. Usachev, A.L. Shurayts, A.V. Rulev, D.V. Salin. Submit December 12, 2014, published December 12, 2015. (In Russian)
8. Usachev A.P., Shurayts A.L., Salin D.V., Usuev Z.M. Development of the Principle and Mathematical Model of Reduction of Integral Costs in Cylindrical Vertically Installed Filtering Devices. Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business, 2016, Vol. 14, No. 3, P. 159–164. (In Russian)
9. Patent No. 116365 RF. Installation of Natural Gas Purification from Solid Particles / A.P. Usachev, A.L. Shurayts, S.V. Gustov, et al. Submit November 21, 2011, published May 27, 2012. (In Russian)
10. State Standard GOST 9544–2015. Pipeline Valves. Leakage Rates of Valves. Moscow, Standartinform, 2015, 74 p. (In Russian)
11. Usachev A.P., Shurayts A.L., Gustov S.V., Sherstyuk P.V. Substantiation of the Mesh Cell Size of the Filter Elements of the Protection Systems Preventing the Entry of Solid Particles into the Gas Control Units, Metering Stations and Gas-Based Units. Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business, 2010, Vol. 8, No. 2, P. 77–81. (In Russian)
12. State Standard GOST 6613–86. Wire Cloth Nets with Square Mesh. Specifications. Moscow, Publishing and Polygraphic Center “Izdatelstvo standartov”, 1998, 12 p. (In Russian)
13. Patent No. 166735 RF. Device for Preventing the Spread of Debris beyond the Natural Gas Filter Element / A.P. Usachev, A.L. Shurayts, A.V. Rulev, et al. Applicant and patent holder: Gipronigaz OJSC. Submit April 27, 2016, published December 10, 2016.
14. Usachev A.P., Shurayts A.L., Salin D.V., Usuev Z.M. Development of Principles for Preventing Deformation of Corrugated Natural Gas Filtering Devices Equipped with Cylindrical Supporting Shells with Longitudinal Web Stiffeners // Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduknov = Problems of Collecting, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products, 2016, No. 3, P. 172–183. (In Russian)
15. Usachev A.P., Shurayts A.L., Salin D.V., Danshev A.E. Perfection of Methodological Approaches to Measuring the Pressure Drop on Cylindrical Filter Elements of Modern Gas Filters of the Mesh Type. Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business, 2015, Vol. 13, No. 1, P. 131–136. (In Russian)
16. Patent No. 157997 RF. Installation of Primary Purification of Natural Gas with a Cylindrical Filter Element of the Mesh Type / A.P. Usachev, A.L. Shurayts, A.V. Rulev, D.V. Salin. Submit December 12, 2014, published December 20, 2015. (In Russian)
17. Patent No. 174446U1 RU. Device for Purification from Solid Particles of Natural Gas of High Pressure / A.P. Usachev, A.L. Shurayts, A.V. Rulev, et al. Submit April 6, 2017, published October 13, 2017.