

УДК 621.6.036

А.П. Усачев (ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина», г. Саратов, Российская Федерация), А.Л. Шурайц, Д.В. Салин, З.М. Усуев (ОАО «Гипрониигаз», г. Саратов, Российская Федерация)

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО ОБОСНОВАНИЮ ВЕЛИЧИНЫ ПАДЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ФИЛЬТРУЮЩЕМ ЭЛЕМЕНТЕ СЕТЧАТОГО ТИПА, ПРИ КОТОРОЙ ДОЛЖНА ПРОВОДИТЬСЯ ЕГО ОЧИСТКА ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

A.P. Usachev (FSBEI HE «Yuri Gagarin Technical University of Saratov», Saratov, Russian Federation), A.L. Shuraits, D.V. Salin, Z.M. Usuev (Giproniigaz OAO, Saratov, Russian Federation)

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL TO SUBSTANTIATE THE VALUE OF PRESSURE DROP IN THE NET-TYPE FILTER ELEMENT, AT WHICH THE FILTER MUST BE CLEANED FROM MECHANICAL IMPURITIES

### Введение

В настоящее время в газорегуляторных пунктах получила распространение предварительная очистка газа с помощью фильтров с применением фильтрующей сетки, являющейся наиболее экономичной для этих целей.

### Цели и задачи

Разработка математической модели по обоснованию величины падения давления на фильтрующем элементе сетчатого типа, при которой должна проводиться его очистка от механических загрязнений.

### Результаты

В работе доказано противоположно направленное влияние величины падения давления на газовом фильтрующем элементе на основе фильтрующей сетки на капитальные вложения в фильтр, с одной стороны, и на эксплуатационные затраты, связанные с удалением твердых частиц, с другой. На этой основе разработана математическая модель технико-экономического обоснования величины максимально допустимого падения давления на фильтрующем элементе, обусловленного постепенным засорением фильтрующей сетки. Модель включает в себя структурную схему, целевую функцию интегральных затрат, уравнения баланса расходов и ограничения управляющего параметра. В качестве критерия при определении оптимума целевой функции математической модели принят минимум интегральных затрат в фильтр. Характерной особенностью принятой целевой функции является наличие дробных степеней, которое приводит к необходимости решения сложного трансцендентного уравнения, что представляет собой весьма трудоемкий процесс последовательных итераций. Поэтому для определения оптимального падения давления на фильтрующем элементе был использован чис-

### Background

Currently, gas control stations use the gas cleaning systems based on filter net, which is the most cost effective for cleaning purposes.

### Aims and Objectives

Development of a mathematical model to substantiate the value of pressure drop in the mesh-type filter element, at which the filter must be cleaned from mechanical impurities

### Results

In this paper it is proved that the value of the pressure drop at the gas net-type filter element inversely impact on the capital investment into the filter, on the one hand, and on the operating costs associated with the removal of solid particles, on the other hand. On this basis a mathematical model was developed to substantiate the maximum allowed pressure drop in the filter element, caused by gradual clogging of the filter net. The model includes a block diagram, the efficiency function of the integral costs, equations of the balance of expenditure, and limitations of the control parameter. Minimal integral cost of the filter is the taken as a criterion to determine optimum of the efficiency function of the mathematical model. The adopted efficiency function is featured by fractional powers, which makes necessary to solve a complex transcendental equation, and this is a rather time-consuming process of successive iterations. Therefore, to determine the optimal pressure drop across the filter element the numerical method of solving the problem was used, that is, a set of values of the pressure drop with known geometric filter parameters being given, we determine the integral costs. The optimal pressure drop on filter element corresponds to the option with minimal costs.



При попадании потока газа на наружную поверхность стакана А и дальнейшем его прохождении через ФЭ одна часть механических примесей осаждается на его поверхности и в толще слоя, другая часть аккумулируется в накопителе Б. Степень загрязнения фильтра определяется по перепаду давления на ФЭ. При засорении фильтра необходимо раскрутить болтовые соединения Ж, снять крышку З с фланцем Е, вынуть ФЭ и, при необходимости, очистить или заменить его. Твердые частицы и грязь из корпуса удаляются через патрубок В.

В применяемых конструкциях сетчатых газовых фильтров удаление твердых частиц с поверхности ФЭ осуществляется при достижении падения давления на нем до максимально допустимых значений  $\Delta P_{\text{м.д.п}}$ . В настоящее время с появлением на отечественном рынке большого количества газовых фильтров отдельные производители и эксплуатационные организации без должного обоснования устанавливают различные значения максимально допустимых падений давления  $\Delta P_{\text{м.д.п}}$  с тенденцией в сторону их увеличения, что приводит к возникновению аварийных ситуаций и инцидентов, сопровождающихся повреждением фильтрующих элементов.

Во избежание ошибок, связанных с разными подходами при принятии значения максимально допустимого падения давления  $\Delta P_{\text{м.д.п}}$ , следует иметь в виду, что все фильтрующие однослойные сетки работают по принципу осаждения твердых частиц только на своей наружной поверхности [5, 6, 7], в отличие от волокнистых нетканых полотен, осаждающих твердые частицы по всей своей толщине на порядок большей [8, 9], чем у аналогов сетчатого типа. Такой одинаковый характер осаждения на всех однослойных сетках обуславливает однообразную зависимость падения давления от степени засорения фильтрующей поверхности и предопределяет одинаковую величину максимально допустимого падения давления для всех типов ФЭ из плетеных металлических сеток.

Из проведенного анализа следует, что величина максимально допустимого падения давления  $\Delta P_{\text{м.д.п}}$  на ФЭ оказывает существенное влияние на значения: эксплуатационных затрат, связанных с количеством операций по удалению твердых частиц в течение года; капитальных вложений в изготовление фильтра, необходимых для обеспечения пропуска максимального часового расхода газа в любой момент эксплуатации, включая и момент максимального засорения поверхностей ФЭ твердыми частицами.

С одной стороны, увеличение перепада давления до значения  $\Delta P_{\text{м.д.п}}$  на ФЭ приводит к уменьшению эксплуатационных затрат  $I(\Delta P_{\text{м.д.п}})$  вследствие сокращения количества операций по удалению из фильтра твердых частиц в течение года  $n_{\Delta P_{\text{м.д.п}}}$  и увеличению продолжительности работы фильтра  $\tau_{\text{оч}}$  между двумя соседними операциями очистки. Здесь количество операций по очистке, проводимых в течение года, определяется как отношение числа дней в году  $\tau_{\text{год}}$  к продолжительности периода  $\tau_{\text{оч}}$  между двумя очередными операциями по удалению твердых частиц из фильтра, то есть  $n_{\Delta P_{\text{м.д.п}}} = \tau_{\text{год}} / \tau_{\text{оч}}$ .

С другой стороны, исходя из условия обеспечения максимальной пропускной способности фильтра в любой момент эксплуатации рост величины перепада давления  $\Delta P_{м.д.п}$  на ФЭ приводит к увеличению капитальных вложений в ФЭ и корпус фильтра из-за увеличения степени засорения сетки и, как следствие, увеличения площади фильтрующего элемента, необходимой для обеспечения пропуска максимального часового расхода газа в любой момент эксплуатации.

Эта взаимосвязь вытекает из основного условия работы фильтра, то есть обеспечения максимальной пропускной способности в любой момент его эксплуатации, численно равной максимальному часовому расходу газа, с целью сохранения объема его поставок. Однако рост величины перепада давления  $\Delta P_{м.д.п}$  на ФЭ вследствие увеличения степени засорения сетки приводит к снижению пропускной способности фильтра. В этом случае для обеспечения максимальной пропускной способности при росте величины перепада давления в момент времени  $\tau_{оч}$  до значения  $\Delta P_{м.д.п}$  необходимо увеличивать фильтрующую площадь, то есть увеличивать диаметр  $D_{j=1}$  и/или высоту  $H_{j=1}$  ФЭ. Это приводит к увеличению капитальных вложений в ФЭ и, следовательно, в корпус фильтра для его размещения. Таким образом, прирост капитальных вложений  $\Delta K_j$  становится функцией перепада давления  $\Delta P_{м.д.п}$  в момент времени  $\tau_{оч}$  вследствие увеличения степени засорения сетки, то есть  $\Delta K_j(\Delta P_{м.д.п})$ .

Приведенный выше анализ показал, что при увеличении перепада давления  $\Delta P_{м.д.п}$  вследствие более продолжительного периода засорения сетки, эксплуатационные затраты  $I(\Delta P_{м.д.п})$  уменьшаются, а капитальные вложения  $\Delta K_j(\Delta P_{м.д.п})$ , связанные с необходимостью увеличения размеров  $D_{j=1}$  и  $H_{j=1}$  для обеспечения пропускной способности фильтра, увеличиваются, и наоборот.

Таким образом, имеются два противоборствующих параметра:  $I(\Delta P_{м.д.п})$  и  $\Delta K(\Delta P_{м.д.п})$ , которые противоположно зависят от изменения перепада давления  $\Delta P_{м.д.п}$  на ФЭ вследствие засорения сетки.

Комплексный учет указанных факторов требует разработки достоверной математической модели оптимизации перепада давления на ФЭ, базирующейся на положениях системного подхода [10, 11, 12], основным из которых является разработка математической модели.

Предлагаемая математическая модель определения оптимальной величины перепада давления  $\Delta P_{м.д.п}$  на ФЭ сетчатого типа включает структурную схему (рисунок 1), целевую функцию интегральных затрат (1), (2) и (5) - (13), систему ограничений управляющих параметров (3), балансовое уравнение (4).

В качестве критерия оптимальности целевой функции принят минимум интегральных затрат в фильтр [13]:

$$Z_i = \sum_j^J (1 + \varphi_d) \Delta K_j(\Delta P_{м.д.п}) + \sum_{t=1}^T a_t \left[ \sum_{m=1}^{m=3} \varphi_{м.э} (1 + \varphi_d) \sum_j^J \Delta K_j(\Delta P_{м.д.п}) + \sum_{m=4}^M I_m(\Delta P_{м.д.п}) \right] = \min; (1)$$

$$a_t = (1 + E)^{-t}; j = \overline{1, J}; m = \overline{1, M}; t = \overline{1, T}, (2)$$

где  $t$  - расчетный год эксплуатации фильтра, год;

$T$  - срок службы фильтра, год, принимается равным сроку службы ГРП,

$T = 25$  лет;

$a$  - коэффициент дисконтирования, год;

$j$  - количество элементов капитальных вложений в газовый фильтр;

$E$  - норма дисконта, принимаемая равной средней кредитной ставке банка в условиях устойчивой рыночной экономики,  $E = 0,12 \text{ год}^{-1}$ ;

$\varphi_d$  - доля отчислений от  $\Delta K_j(\Delta P_{м.д.п})$  на монтаж  $j$ -ого элемента газового фильтра, д.е.;

$\Delta P_{м.д.п}$  - максимально допустимый перепад давления на фильтрующем элементе в точке  $n$  вследствие засорения сетки твердыми частицами, кПа;

$\Delta K_j(\Delta P_{м.д.п})$  - прирост капвложений в изготовление  $j$ -ого элемента фильтра в точке  $n$ , обеспечивающего заданный расход газа при значении падения давления  $\Delta P_{м.д.}$ , руб.;

$m$  - количество элементов эксплуатационных затрат для газового фильтра;

$\varphi_{м.э}$  - доля годовых отчислений от  $K_j(\Delta P_{м.д.})$  на эксплуатацию  $j$ -ого элемента газового фильтра, связанная с его обслуживанием, текущим и капитальным ремонтом, 1/год;

$I_m(\Delta P_{м.д.п})$  -  $m$ -ый вид эксплуатационных затрат, связанный с количеством удаленных твердых частиц из фильтра в течение года, которые осуществляются в момент времени  $\tau_{оч}$ , при значении перепада давления  $\Delta P_{м.д.п}$ , руб./год.

Система ограничений управляющего параметра целевой функции (1):

$$\Delta P_{м.д.п. \min} \leq \Delta P_{м.д.п} \leq \Delta P_{м.д.п. \max}, \quad (3)$$

$\Delta P_{м.д.п. \min}$ ,  $\Delta P_{м.д.п. \max}$  - соответственно минимальное и максимальное значения интервала изменения параметра  $\Delta P_{м.д.п}$ , исходя из режима засорения ФЭ твердыми частицами, кПа.

Уравнение баланса предлагаемой математической модели формулируется следующим образом: пропускная способность фильтра при достижении степени засорения ФЭ, соответствующей максимально допустимому значению падения давления  $\Delta P_{м.д.п}$ , должна быть не менее расчетного расхода природного газа, установленного исходя из запланированных поставок  $V_t$  в период времени от  $t = t_n$  до  $t_k$ :

$$V_{\Delta P_{м.д.п}} = \sum_{t=t_n}^{t=t_k} V_t, \quad (4)$$

где  $V_{\Delta P_{м.д.п}}$  - пропускная способность фильтра при достижении степени засорения ФЭ, соответствующей максимально допустимому значению падения давления  $\Delta P_{м.д.п}$ ;

$t_n$  - момент времени, соответствующий началу эксплуатации после очередного удаления твердых частиц с поверхностей ФЭ сетчатого типа, ч;

$t_k$  - момент времени соответствующий концу эксплуатации перед очередным удалением твердых частиц с поверхностей ФЭ сетчатого типа, при достижении которого создается риск уменьшения его пропускной способности, ч;

$V_t$  - максимальный расчетный расход природного газа, установленный для периода времени  $t$  при его изменении от  $t = t_n$  до  $t_k$ , исходя из запланированных поставок газа, м<sup>3</sup>/ч.

Ограничением к модели (1) - (14) является величина скорости фильтрации газа через плетеную металлическую сетку, определяемая как отношение  $V_{\max}/F_p$ , обеспечивающая качественный процесс осаждения твердых частиц без деформации ФЭ. Согласно данным предприятий-изготовителей, скорость фильтрации принимается равной  $V_{\max}/F_p=0,5...1,0$  м/с с учетом диаметра фильтра [14].

Выявим аналитические зависимости для различных элементов капвложений и эксплуатационных затрат в целевой функции (1).

1. Прирост капитальных вложений в ФЭ  $J=1$  в точке  $n$ , необходимый для пропуска через него максимального расхода газа, определяется следующим образом:

$$\Delta K_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n}) = k_{j=1} \cdot [F_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n}) - F_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n-1})]; \quad (5)$$

$$F_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n}) = \pi \cdot D_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n}) \cdot H_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n}); F_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n-1}) = \pi \cdot D_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n-1}) \times H_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n-1}), \quad (6)$$

$k_{j=1}$  - удельные капитальные вложения в изготовление ФЭ, руб./м<sup>2</sup>;

$F_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n})$ ,  $F_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n-1})$  - соответственно полная поверхность ФЭ, необходимая для пропуска через него максимального расхода газа, применительно к ФЭ, засоренному твердыми частицами до момента падения давления на нем до значений  $\Delta P_{\text{м.д.}n}$  и  $\Delta P_{\text{м.д.}n-1}$ , м<sup>2</sup>;

$D_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n})$ ,  $H_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n})$  - соответственно диаметр и высота ФЭ, необходимые для пропуска через него максимального расхода газа, применительно к ФЭ, засоренному твердыми частицами до падения давления на нем до значения  $\Delta P_{\text{м.д.}n}$ , м;

$D_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n-1})$ ,  $H_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n-1})$  - соответственно диаметр и высота, необходимые для пропуска максимального расхода газа, применительно к фильтрующему элементу, засоренному твердыми частицами до момента падения давления на нем до значения  $\Delta P_{\text{м.д.}n-1}$ , м.

Здесь  $\Delta P_{\text{м.д.}n, \min}$ , ...,  $\Delta P_{\text{м.д.}n-1}$ , ...,  $\Delta P_{\text{м.д.}n}$ , ...,  $\Delta P_{\text{м.д.}n, \max}$  - значения падения давления на ФЭ в интервале  $\Delta P_{\text{м.д.}n, \min} \leq \Delta P_{\text{м.д.}n} \leq \Delta P_{\text{м.д.}n, \max}$ .

Задаваясь высотой ФЭ, величина полной поверхности обусловливается значением диаметра ФЭ, который определяется в момент падения давления на нем до значения  $\Delta P_{\text{м.д.}n}$  согласно [2] по формуле:

$$D_{j=1}(\Delta P_{\text{м.д.}n}) = \left( \frac{1}{\Delta P_{\text{м.д.}n}} \cdot \frac{\zeta_f \cdot V_t^2 \cdot \rho}{2 \cdot g \cdot \pi^2 \cdot H_{j=1}^2(\Delta P_{\text{м.д.}n}) \cdot f^2 \cdot 3600^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где  $\Delta P_{\text{м.д.}n}$  - перепад давления, вызванный засорением сетки твердыми частицами при изменении  $\Delta P_{\text{м.д.}n}$  в интервале  $\Delta P_{\text{м.д.}n, \min} \leq \Delta P_{\text{м.д.}n} \leq \Delta P_{\text{м.д.}n, \max}$ , даПа (кг/м<sup>2</sup>);

$\zeta_f$  - коэффициент местного сопротивления фильтрующей сетки, зависящий от величины относительной активной поверхности ФЭ, оставшейся после засорения сетки твердыми частицами;

$f$  - величина относительной активной поверхности фильтрующего элемента, оставшаяся после засорения твердыми частицами, д.е.;

$V_f$  - пропускная способность фильтрующего элемента при фактическом давлении газа в фильтре, принимаемая численно равной максимальному расчетному расходу газа, определяемому согласно [15, 16], м<sup>3</sup>/ч;

$g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\rho$  - плотность природного газа при его фактическом давлении в фильтре, кг/м<sup>3</sup>.

2. Прирост капитальных вложений в корпус фильтра  $J = 2$ , необходимый для пропуска через него максимального расхода газа, определяется следующим образом:

$$\Delta K_{j=2}(\Delta P_{м.д.п}) = K_{j=2}(\Delta P_{м.д.п}) - K_{j=2}(\Delta P_{м.д.п-1}), \quad (8)$$

$\Delta K_{j=2}(\Delta P_{м.д.п})$ ,  $K_{j=2}(\Delta P_{м.д.п-1})$  - соответственно капитальные вложения в корпус фильтра, необходимые для пропуска через него максимального расхода газа, применительно к фильтрующему элементу, засоренному твердыми частицами до падения давления на нем до значений  $\Delta P_{м.д.п}$  и  $\Delta P_{м.д.п-1}$ , руб.

Капитальные вложения в корпус фильтра в конечном итоге зависят от величины падения давления на ФЭ, изменение которого приводит к изменению значения  $D_{j=1}(\Delta P_{м.д.п})$ . Учитывая, что наружный диаметр корпуса фильтра  $D_{j=2}$  отличается от значения  $D_{j=1}(\Delta P_{м.д.п})$  на величину удвоенного расстояния между наружной поверхностью ФЭ и внутренней поверхностью корпуса фильтра  $\cdot$  и удвоенного значения  $S$  (рисунок 1), то есть  $D_{j=2} = 2(D_{j=1}(\Delta P_{м.д.п}) + \delta + S)$ , выражение для определения капвложений в корпус фильтра в момент падения давления на ФЭ до значения  $\Delta P_{м.д.п}$  можно записать в следующем виде:

$$K_{j=2}(\Delta P_{м.д.п}) = k_{о.д} \cdot \rho_{ст} \cdot \pi (D_{j=1}(\Delta P_{м.д.п}) + 2(\delta + S))^2 (\Phi + 0,69) \cdot (S + \delta_{кор}) + \frac{2\pi k_{ф.с} \rho_{ст}}{4} \cdot \left\{ b_{\phi} \left[ (D_{j=1}(\Delta P_{м.д.п}) + 2(\delta + S + e_{\phi} + C_{\phi}))^2 - (D_{j=1}(\Delta P_{м.д.п}) + 2(\delta + S + e_{\phi}))^2 - nd_0^2 \right] + \right. \\ \left. + h \left[ (D_{j=1}(\Delta P_{м.д.п}) + 2(\delta + S + e_{\phi} + C_{\phi l}))^2 - (D_{j=1}(\Delta P_{м.д.п}) + 2(\delta + S + e_{\phi}))^2 \right] \right\}, \quad (9)$$

где  $k_{о.д}$  - удельные капитальные вложения в изготовление стальных цилиндрической обечайки, эллиптических крышки и днища фильтра, выполненных согласно [17] в расчете на единицу их металлоемкости, руб./кг;

$k_{ф.с}$  - удельные капитальные вложения в изготовление фланцевого соединения, состоящего из двух плоских приварных стальных фланцев, изготовленных согласно [18] в расчете на единицу их металлоемкости, руб./кг;

$\rho_{ст}$  - плотность стали, кг/м<sup>3</sup>;

$D_{j=1}(\Delta P_{м.д.п})$  - диаметр фильтрующего элемента, засоренного твердыми частицами до падения давления на нем до значения  $\Delta P_{м.д.п}$ , рассчитанного на пропуск через него максимального расхода газа, м;

$\delta$  - расстояние между наружной поверхностью ФЭ и внутренней поверхностью корпуса фильтра, м;

$S$  - толщина стенок цилиндрической оболочки, эллиптических крышки и днища корпуса фильтра, выполненных согласно [17], м;

$\Phi$  - оптимальная величина фактора формы корпуса фильтра, принимаемая согласно [2];

$\delta_{кор}$  - запас толщины металла на коррозию [17], м;

$b_{\phi}$  - толщина стального фланца с уплотнительной поверхностью типа «соединительный выступ», принимается по [18] при величине рабочего давления  $P$  в корпусе фильтра (рисунок 1), м;

$e_{\phi}$  - нормативная величина конструктивного зазора между внутренней боковой поверхностью фланца и наружной боковой поверхностью обечайки или крышки (рисунок 1), м;

$C_{\phi}$  - полная ширина фланца, принимается как разность наружного и внутреннего диаметров фланца по [18] при величине рабочего давления  $\Delta P_{м.д.п}$  в корпусе фильтра (рисунок 1), м;

$h$  - толщина соединительного выступа фланца с уплотнительной поверхностью типа «соединительный выступ», принимается по [18] при величине рабочего давления  $\Delta P_{м.д.п}$  в корпусе фильтра, м;

$C_{\phi 1}$  - полная ширина соединительного выступа фланца, принимается как разность наружного диаметра уплотнительного выступа и внутреннего диаметров фланца по [18] при величине рабочего давления  $\Delta P_{м.д.п}$  в корпусе фильтра, м;

$n$  - количество отверстий для болтовых соединений во фланце, принимается по [18], шт.;

$d_o$  - диаметр отверстий во фланце для болтовых соединений (рисунок 1), принимается по [18] м.

Оптимальная величина фактора формы корпуса фильтра, равная оптимальному отношению его высоты  $H_{j=2}$  к диаметру  $D_{j=2}$ , то есть  $\Phi = H_{j=2}/D_{j=2}$  (рисунок 1), определяется согласно [2].

Капитальные вложения в корпус фильтра в момент падения давления на ФЭ до значения  $\Delta P_{м.д.п-1}$  можно также определять по формуле (9), предварительно вычислив величину диаметра  $D_{j=1}(\Delta P_{м.д.п-1})$  по формуле (7) при значении падения давления, равном  $\Delta P_{м.д.п-1}$ .

Слагаемое  $\varphi_{д} \sum_j^J K_j(\Delta P_{м.д.п})$  в целевой функции (1) представляет собой допол-

нительные капитальные вложения в монтаж  $j$ -ого элемента фильтра, связанные с установкой его на опоры, присоединением к входному и выходному газопроводам, датчикам и проводам системы сигнализации, испытанием и сдачей в эксплуатацию, и определяются как доля отчислений от основных капвложений  $K_{j=2}(\Delta P_{м.д.п})$  на монтаж.

Используя выражение (9), можно определить капитальные вложения в корпус фильтра для любого значения  $\Delta P_{м.д.п}$  для ряда значений падения давления на ФЭ в интервале  $\Delta P_{м.д.п.min}, \dots, \Delta P_{м.д.п-1}, \dots, \Delta P_{м.д.п}, \dots, \Delta P_{м.д.п.max}$ , согласно ограничению (3):  $\Delta P_{м.д.п.min} \leq \Delta P_{м.д.п} \leq \Delta P_{м.д.п.max}$ .

Таким образом, определяя капитальные вложения согласно выражению (9) в корпус фильтра для двух величин падения давления  $\Delta P_{м.д.п-1}$ ,  $\Delta P_{м.д.п}$ , получаем приращение по формуле (8).

3. Расходы по эксплуатации в выражении целевой функции (1) определяются следующим образом.

3.1 Эксплуатационные затраты, связанные с капитальным ( $m = 1$ ), текущим ( $m = 2$ ) ремонтами и обслуживанием ( $m = 3$ ), определяются с учетом (1) как доля годовых отчислений на эксплуатацию от  $K_j(\Delta P_{м.д.п})$  по формуле

$$\sum_{m=1}^{m=3} \varphi_{м.э} (1 + \varphi_d) \sum_j K_j (\Delta P_{м.д.п}) \cdot \quad (10)$$

Эксплуатационные затраты, связанные с регенерацией ФЭ, то есть с его очисткой от твердых частиц, определяются по формуле

$$\sum_{m=4}^{m=9} I_m (\Delta P_{м.д.п}) = \frac{\tau_{год}}{\tau_{оч} (\Delta P_{м.д.п})} \cdot (I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8 + I_9), \quad (11)$$

где  $\tau_{год}$  - число суток в году;

$\tau_{оч} (\Delta P_{м.д.п})$  - продолжительность работы фильтра между двумя соседними операциями по удалению из него твердых частиц, сут;

$I_4$  - затраты, связанные с переключением на резервную линию, а также с переключением на рабочую линию очистки после удаления загрязнений из фильтра, руб./год;

$I_5$  - затраты, связанные со сбросом давления и продувкой узла очистки инертным газом, руб./год;

$I_6$  - затраты, связанные с установкой поворотных заглушек, а также с их демонтажом после очистки фильтра от загрязнений, руб./год;

$I_7$  - затраты, связанные с демонтажом болтовых соединений и крышки с фильтра, а также с обратным монтажом указанных элементов после удаления загрязнений из фильтра, руб./год;

$I_8$  - затраты в демонтаж ФЭ и обратный монтаж после их очистки от загрязнений, руб./год;

$I_9$  - затраты в очистку фильтрующих сеток ФЭ от твердых частиц и других загрязнений, дальнейшую промывку и просушку, контроль сеток на соответствие номинальным размерам, степень абразивного износа, пробои, смятие, руб./год.

Эксплуатационные расходы, связанные с выполнением всего комплекса работ по очистке фильтра, при изменении видов работ от  $m = 4$  до  $m = 9$ , определяются по формуле:

$$I_m = \tau_m \cdot n_m \cdot c, \quad (12)$$

$\tau_m$  - продолжительность  $m$ -ого вида работ, связанного с очисткой фильтра сетчатого типа от твердых частиц, ч;

$n_m$  - количество работников эксплуатационной организации, осуществляющих очистку наружной поверхности ФЭ от твердых частиц, чел.;

$c$  - часовая зарплата одного работника эксплуатационной организации, осуществляющего работы, связанные с очисткой фильтра сетчатого типа от твердых частиц, руб./ч·чел.

Учитывая одинаковую величину часовой зарплаты одного работника, осуществляющего любой вид работ от  $m = 4$  до  $m = 9$  ( $c = \text{const}$ ) и одно и то же количество работников  $n_m = \text{const}$ , суммарные затраты, связанные с одной операцией по очистке фильтра сетчатого типа от твердых частиц, можно определить по формуле:

$$(I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8 + I_9) = c \cdot n_m \cdot \sum_{m=4}^{m=9} \tau_m. \quad (13)$$

Согласно данным газораспределительных организаций, осуществляющих работы, связанные с очисткой отечественных фильтров сетчатого типа высокой пропускной способности (100000...150000 м<sup>3</sup>/ч), суммарная продолжительность работ в интервале

от  $m = 4$  до  $m = 9$  составит  $\sum_{m=4}^{m=9} \tau_m = 9,0$  ч.

По известным значениям продолжительности работы фильтра между двумя соседними операциями  $\tau_{оч}$ , суммарной продолжительности работ в интервале от  $m = 4$  до  $m = 9$ , равной  $\sum_{m=4}^{m=9} \tau_m = 9,0$  ч, определяем *эксплуатационные затраты*, связанные с

очисткой фильтрующего элемента от твердых частиц  $\sum_{m=4}^{m=9} I_m(\Delta P_{м.д.п})$  при различных значениях падения давления, в интервале  $\Delta P_{м.д.мин}, \dots, \Delta P_{м.д.п-1}, \dots, \Delta P_{м.д.п}, \dots, \Delta P_{м.д.мак}$  согласно ограничению (3).

Совместный анализ уравнений (1) - (13) показывает, что исходная целевая функция задачи для фильтра сетчатого типа заданного геометрического объема, представляет собой выражение следующего вида:

$$Z = f(\Delta P_{м.д.п}). \quad (14)$$

Характерной особенностью целевой функции (1) - (13) является наличие дробных степеней. В этой связи последующее применение аналитических методов исследования функции на экстремум приводит к необходимости решения сложного трансцендентного уравнения вида:

$$\frac{dZ}{d(\Delta P_{м.д.п})} = 0, \quad (15)$$

что представляет собой весьма трудоемкий процесс последовательных итераций. Поэтому для определения оптимального падения давления на фильтрующем элементе представляется более целесообразным применение численного метода решения задачи [19, 20].

Задаваясь рядом значений параметра  $\Delta P_{м.д.мин}, \dots, \Delta P_{м.д.п-1}, \dots, \Delta P_{м.д.п}, \dots, \Delta P_{м.д.мах}$ , при известных геометрических параметрах фильтра, определяем интегральные затраты  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$ .

Варианту с минимальными затратами  $Z_{мин}$  соответствует оптимальное падение давления на фильтрующем элементе  $(\Delta P_{м.д.п})_{opt}$ .

### Выводы

1. Из проведенного анализа следует, что величина максимально допустимого падения давления  $\Delta P_{м.д.п}$  на ФЭ является управляющим параметром, поскольку оказывает противоположное влияние на значения эксплуатационных затрат и капитальных вложений в ФЭ и корпус фильтра. С одной стороны, увеличение перепада давления до значения  $\Delta P_{м.д.п}$  на ФЭ приводит к уменьшению эксплуатационных затрат вследствие сокращения количества операций по удалению твердых частиц из фильтра в течение года. С другой стороны, исходя из условия обеспечения максимальной пропускной способности фильтра, в любой момент эксплуатации рост величины перепада давления  $\Delta P_{м.д.п}$  на ФЭ приводит к увеличению капитальных вложений в фильтрующий элемент и корпус фильтра.

2. Разработана математическая модель по определению оптимальной величины максимально допустимого падения давления на фильтрующем элементе сетчатого типа, включающая структурную схему (рисунок 1), целевую функцию интегральных затрат (1), (2) и (5) - (13), систему ограничений управляющего параметра (3), балансовое уравнение (4).

3. Предложенная математическая модель позволяет минимизировать эксплуатационные расходы в операции по удалению твердых частиц из ФЭ и капитальные вложения в фильтр при обеспечении его максимальной пропускной способности.

### Литература

1. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Густов С.В., Желанов В.П. Обоснование типа системы очистки природного газа, устанавливаемой перед регулирующей, предохранительной, защитной арматурой и узлами учета газорегуляторных пунктов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. Уфа, 2011. Вып. 1 (83). С. 159-167.
2. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Густов С.В. Теоретические и прикладные основы повышения эффективности и безопасности эксплуатации установок грубой очистки природного газа от твердых частиц в системах газораспределения. Саратов: Саратовск. гос. техн. ун-т, 2013. 172 с.
3. Промышленное газовое оборудование: справочник. 5-е изд., перераб. и доп. Саратов: Газовик, 2010. 992 с.
4. Шур И.А. Газорегуляторные пункты и установки. Л.: Недра, 1985. 288 с.
5. Страус В. Промышленная очистка газов: Пер. с англ. М.: Химия, 1981. 616 с.
6. Биргер М.И., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. и др. Справочник по пыле- и золоулавливанию. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
7. СТО 03321549-023-2013. Рекомендации по повышению эффективности установок грубой очистки природного газа от твердых частиц в системах газоснабжения / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, С.В. Густов, П.В.

### References

1. Usachev A.P., Shuraitz A.L., Gustov S.V., Zhelanov V.P. Obosnovanie tipa sistemy ochistki prirodnogo gaza, ustanavlivaemoi pered reguliruyushchei, predokhranitel'noi, zashchitnoi armaturoi i uzlami ucheta gazoregulyatornykh punktov [Substantiation of the Type of Natural Gas Purification System Installed before Control and Safety Valves and Metering Stations of Gas Control Units]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2011, Issue 1 (83), pp. 159-167. (in Russ.).
2. Usachev A.P., Shuraitz A.L., Gustov S.V. *Teoreticheskie i prikladnye osnovy povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii ustanovok gruboi ochistki prirodnogo gaza ot tverdykh chastiits v sistemakh gazoraspredeleniya* [Theoretical and Applied Principles of Improving Operation Efficiency and Safety of the Plants for Primary Natural Gas Cleaning from Solids in Gas Distribution Systems]. Saratov, Saratovsk. gos. tekhn. un-t, 2013. 172 p. (in Russ.).
3. *Promyshlennoe gazovoe oborudovanie: spravochnik* [Industrial Gas Equipment: Manual]. 5-e izd., pererab. i dop. Saratov, Gazovik, 2010. 992 p. (in Russ.).
4. Shur I.A. *Gazoregulyatornye punkty i ustanovki* [Gas Control Points and Units]. Leningrad, Nedra, 1985. 288 p. (in Russ.).
5. Straus V. *Promyshlennaya ochistka gazov*. Per. s angl. [Industrial Gas Treatment: Transl. from Engl.]. Mos-

Шерстюк и др. Саратов: ОАО «Гипрониигаз», 2013. 62 с.

8. Мазус М.Г., Мальгин А.Д., Моргулис М.Л. Фильтры для улавливания промышленных пылей. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.

9. Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н. и др. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. М.: Экспресс-3М, 1998. 505 с.

10. Булатов В.П., Воропай Н.И., Гамм А.З. и др. Системные исследования в энергетике в новых социально-экономических условиях. Новосибирск: Наука, 1995. 189 с.

11. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Гумеров А.Г. Математическая модель оптимизации системы комплексной защиты подземных резервуаров и трубопроводов сжиженного углеводородного газа путем заключения в футляр, заполненный азотом // Нефтегазовое дело. 2008. Т. 6. № 2. С. 38-46.

12. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Густов С.В. Разработка математической модели для определения падения давления на фильтрующем элементе сетчатого типа в процессе засорения его твердыми частицами // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2012. Вып. 2 (88). С. 86-95.

13. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / Утверждены Госкомитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике № ВК447 от 21.06.09. М., 1999. 201 с.

14. СТО 03321549-047-2016. Рекомендации по повышению эффективности и безопасности газовых цилиндрических фильтров с вертикальной компоновкой параллельно установленным фильтрующим элементам / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, Д.В. Салин, З.М. Усуев и др. Саратов: ОАО «Гипрониигаз», 2016. 52 с.

15. СП 42-101-2003. Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб / А.Л. Шурайц, В.С. Волков, В.Е. Удовенко и др. М.: ГУП ЦПП, 2003. 16 с.

16. СП 62.13330.2011. Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01-2002. М.: Минрегион России, 2010. 66 с.

17. ГОСТ Р 52857.2-2007. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. М.: Стандартинформ, 2009. 42 с.

18. ГОСТ 12815-80. Фланцы стальные плоские приварные на  $P_y$  от 0,1 до 2,5 МПа. М.: Изд-во стандартов, 1980. 28 с.

19. Боглаев Ю.П. Вычислительная математика и программирование. М.: Высшая школа, 1990. 544 с.

20. Петров А.В., Алексеев В.Е., Ваулин А.С. и др. Вычислительная техника и программирование / Под ред. А.В. Петрова. М.: Высшая школа, 1990. 479 с.

cow, Khimiya, 1981. 616 p. (in Russ.).

6. Birger M.I., Val'dberg A.Yu., Myagkov B.I. e.a. *Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu* [Handbook on Dust and Ash Trapping]. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Energoatomizdat, 1983. 312 p. (in Russ.).

7. STO 03321549-023-2013. Rekomendatsii po povysheniyu effektivnosti ustanovok gruboi oчитki prirodnogo gaza ot tverdykh chastits v sistemakh gazosnabzheniya [STO 03321549-023-2013. Recommendations for Improving the Safety of Plants for Primary Natural Gas Cleaning from Solids in Gas Distribution Systems]. A.P. Usachev, A.L. Shuraitis, S.V. Gustov, P.V. Sherstyuk e.a. Saratov, ОАО «Giproniigaz», 2013. 62 p. (in Russ.).

8. Mazus M.G., Mal'gin A.D., Morgulis M.L. *Fil'try dlya ulavlivaniya promyshlennykh pylei* [Filters for Industrial Dust Trapping]. Moscow, Mashinostroenie, 1985. 240 p. (in Russ.).

9. Ziganshin M.G., Kolesnik A.A., Posokhin V.N. e.a. *Proektirovanie apparatov pylegazooчитki* [Design of Equipment for Dust Separation and Gas Cleaning]. Moscow, Ekopress-ZM, 1998. 505 p. (in Russ.).

10. Bulatov V.P., Voropai N.I., Gamm A.Z. e.a. *Sistemnye issledovaniya v energetike v novykh sotsial'no-ekonomicheskikh usloviyakh* [System Research in the Energy Sector in the New Socio-Economic Conditions]. Novosibirsk, Nauka, 1995. 189 p. (in Russ.).

11. Usachev A.P., Shuraitis A.L., Gumerov A.G. *Matematicheskaya model' optimizatsii sistema kompleksnoi zashchity podzemnykh rezervuarov i truboprovodov szhizhennogo uglevodorodnogo gaza putem zaklyucheniya v futlyar, zapolnennyi azotom* [Mathematical Model of Improving Complex Protection System of the Underground LPG Tanks and Pipelines by Placing Them In a Casing Filled with Nitrogen]. *Neftgazovoe delo - Oil and Gas Business*, 2008, T. 6, No. 2, pp. 38-46. (in Russ.).

12. Usachev A.P., Shuraitis A.L., Gustov S.V. *Razrabotka matematicheskoi modeli dlya opredeleniya padeniya davleniya na fil'truyshchem elemente setchatogo tipa v protsesse zasoreniya ego tverdymi chastitsami* [Mathematical Model Development for Investigation of the Pressure Drop on the Net-Type Filtering Element Clogged up by Solids]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2012, Issue 2 (88), pp. 86-95. (in Russ.).

13. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov (Utvverzheny Goskomitetom RF po stroitel'noi, arkhitekturnoi i zhilishchnoi politike No. VK447 ot 21.06.09)* [Methodical Recommendations On Estimating Efficiency of Investment Projects (approved by the State Committee of the Russian Federation for Construction, Architecture and Housing Policy No. BK447 dd. 21.06.09)]. Moscow, 1999. 201 p. (in Russ.).

14. СТО 03321549-047-2016. Рекомендации по повышению эффективности и безопасности газовых цилиндрических фильтров с вертикальной компоновкой параллельно установленным фильтрующим элементам / А.П. Усачев, А.Л. Шурайц, Д.В. Салин, З.М. Усуев e.a. Saratov, ОАО «Giproniigaz», 2016. 52 p. (in Russ.).

15. СП 42-101-2003. *Obshchie polozeniya po proektirovaniyu i stroitel'stvu gazoraspredelitel'nykh sistem iz metallicheskhkh i polietilenovykh trub* [SP 42-101-2003. General Provisions For the Design and Construction of Gas Distribution Systems Made of Metal and Polyethylene Pipes]. A.L. Shuraitis, V.S. Volkov, V.E. Udoenko e.a. Moscow, ГУП TsPP, 2003. 16 p. (in Russ.).

16. СП 62.13330.2011. *Gazoraspredelitel'nye sistemy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIП 42-01-2002* [SP 62.13330.2011. Gas Distribution Systems. Update Edition of SNIП 42-01-2002]. Moscow, Minregion Rossii, 2010. 66 p. (in Russ.).

17. ГОСТ R 52857.2-2007. *Normy i metody rascheta na prochnost'. Raschet tsilindricheskikh i konicheskikh obechaek, vypuklykhkh i ploskikh dnishch i kryshek* [State Standard R

52857.2-2007. Norms and Methods of Strength Calculation. Calculation of Cylindrical and Conical Shells, Convex and Flat Heads and Covers]. Moscow, Standartinform, 2009. 42 p. (in Russ.).

18. GOST 12815-80. Flantsy stal'nye ploskie privarnye na  $P_u$  ot 0,1 do 2,5 MPa [State Standard 12815-80. Welded Steel Flat Flanges for  $P_u$  from 0,1 to 2,5 MPa]. Moscow, Izd-vo standartov, 1980. 28 p. (in Russ.).

19. Boglaev Yu.P. *Vychislitel'naya matematika i programmirovaniye* [Computational Mathematics and Programming]. Moscow, Vysshaya shkola, 1990. 544 p. (in Russ.).

20. Petrov A.V., Alekseev V.E., Vaulin A.S. e.a. *Vychislitel'naya tekhnika i programmirovaniye* [Computational Mathematics and Programming]. Pod red. A.V. Petrova. Moscow, Vysshaya shkola, 1990. 479 p. (in Russ.).

#### Авторы

• Усачев Александр Прокофьевич, д-р техн. наук  
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
Профессор кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика»  
Российская Федерация, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77  
тел. (8452) 51-50-18  
e-mail: usachev-ap@mail.ru

• Шурайц Александр Лазаревич, д-р техн. наук  
ОАО «Гипрониигаз»  
Генеральный директор  
Российская Федерация, 410012, г. Саратов, пр. им. С.М. Кирова, д. 54  
тел. (8452) 26-20-42  
e-mail: shuraits@niigaz.ru

Салин Дмитрий Валерьевич  
ОАО «Гипрониигаз»  
Начальник отдела внедрения новой техники  
Российская Федерация, 410012, г. Саратов, пр. им. С.М. Кирова, д. 54  
тел. (8452) 74-95-28

Усуев Заур Мухтарович  
ОАО «Гипрониигаз»  
Начальник конструкторского отдела  
Российская Федерация, 410012, г. Саратов, пр. им. С.М. Кирова, д. 54  
тел. 7-987-311-61-66

#### The Authors

• Usachev Aleksandr P., Doctor of Technical Sciences  
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov  
Professor of Heat and Gas Supply, Ventilation, Water Supply and Applied Hydrodynamics Chair  
77, Politekhnikeskaya str., Saratov, 410054, Russian Federation  
tel: (8452) 51-50-18  
e-mail: usachev-ap@mail.ru

• Shurayts Aleksandr L., Doctor of Technical Sciences  
Giproniigaz OAO  
General Director  
54, S.M. Kirov ave., Saratov, 410012, Russian Federation  
tel: (8452) 26-20-42  
e-mail: shuraits@niigaz.ru

• Salin Dmitriy V.  
Giproniigaz OAO  
Chief of Department Introducing New Technology  
54, S.M. Kirov ave., Saratov, 410012, Russian Federation  
tel: (8452) 74-95-28

• Usuev Zaur M.  
Giproniigaz OAO  
Head of Design Department  
54, S.M. Kirov ave., Saratov, 410012, Russian Federation  
tel: 7-987-311-61-66