

УДК 621.6.036

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫБОРА ВАРИАНТА УСТАНОВКИ ГРУБОЙ ОЧИСТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Усачев А.П., Густов А.П.

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, e-mail: usachev-ap@mail.ru*

***Аннотация.** Приведена математическая модель для выбора варианта установки грубой очистки природного газа, наиболее полно учитывающая все независимые геометрические параметры, не требующая для получения конечного результата использования ряда промежуточных формул и приемлемая для технико-экономического сравнения всех вариантов установок очистки, применяемых в системах газораспределения. Модель включает в себя структурную схему, целевую функцию интегральных затрат, балансовое уравнение, систему ограничений управляющих параметров и позволяет на базе системного подхода привести все конкурирующие варианты к единой структуре и учесть динамику развития системы грубой очистки.*

***Ключевые слова:** природный газ, крупные твердые частицы, система грубой очистки, регулирующая, защитная и предохранительная арматура, газорегуляторный пункт, целевая функция, плетеная металлическая сетка, фильтрующий элемент, математическая модель, выбор, вариант*

В настоящее время в газорегуляторных пунктах (ГРП) получили распространение установки очистки (УО) от крупных твердых частиц (ТЧ) на основе волокнистых, металлопористых и сетчатых фильтрующих элементов (ФЭ) [1]. У каждого из этих типов установок очистки есть свои преимущества и недостатки, которые трудно оценить и сделать правильный выбор без применения соответствующего технико-экономического анализа.

Отдельные аспекты этой важной проблемы освещаются в работах А.Ю. Лякониса [2], Б.Н. Курицына [3], Усачева А.П., Шурайца А.Л., Густова С.В., Желанова В.П. [4, 5].

Наиболее близкими по сути проблемы являются решения, приведенные в работах [4, 5]. Следует отметить, однако, что предложенная в указанных работах математическая модель по выбору варианта установки грубой очистки природного газа учитывает не все независимые геометрические параметры, требует использования ряда промежуточных формул для получения конечного результата и справедлива для технико-экономического сравнения только вариантов установок очистки сетчатого и волокнистого типов.

Комплексный учет указанных факторов требует разработки более достоверной математической модели, базирующейся на основных положениях системного подхода [4 - 6].

Расчетная схема сравниваемых вариантов системы грубой очистки газа от твердых частиц приведена на рис. 1. На расчетной схеме сравниваемые варианты

приведены к единой структуре, т.е. к одинаковой форме, и имеют одинаковое количество элементов p : фильтрующий элемент ($p = 1$); корпус фильтра ($p = 2$).

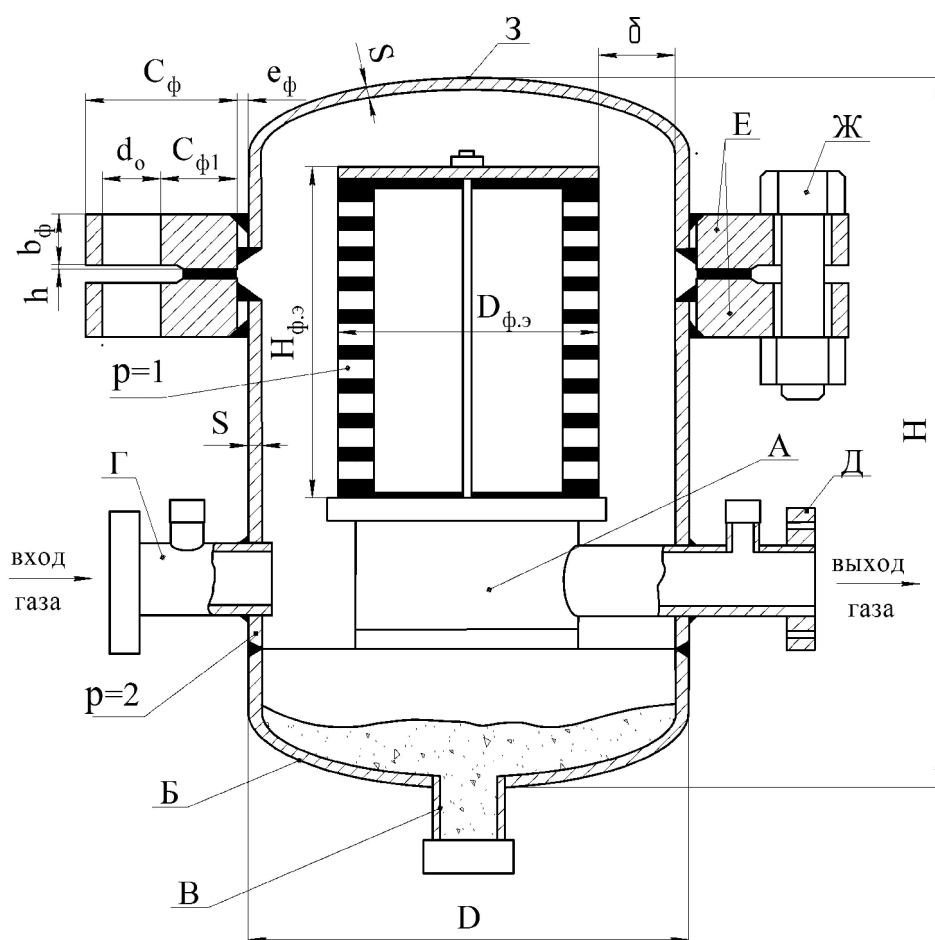


Рис. 1. Структура установки грубой очистки газа от твердых частиц:

А – стакан для крепления ФЭ; Б – накопитель твердых частиц;
 В – патрубок для продувки и удаления ТЧ; Г, Д – входной и выходной патрубки;
 Е – фланцы, необходимые для выема ФЭ; Ж – болтовые соединения фланцев Е;
 З – крышка

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 установки определяется по перепаду давления на фильтрующем элементе. При засорении УО необходимо раскрутить болтовые соединения Ж, снять крышку З с фланцем Е, вынуть фильтрующий элемент и, при необходимости, очистить или заменить. Твердые частицы и грязь из корпуса удаляются через патрубок В.

Математическое моделирование осуществлялось для временного интервала $t = 0, 1, 2, \dots, T$, согласно действующим методическим рекомендациям по оценке эффективности инвестиционных проектов [7].

Предлагаемая математическая модель по выбору варианта УО включает в себя структурную схему (рис. 1), целевую функцию интегральных затрат (1) - (2) и (5) - (11), балансовое уравнение (4), систему ограничений управляющих параметров (3). В качестве критерия оптимальности целевой функции принят минимум интегральных затрат в установку очистки:

$$Z_i = \sum_{f=1}^F a_f (1 + \varphi_{i,m}) \cdot \sum_{p=1}^P K_{i,p}(D_{\phi,\varepsilon}, H_{\phi,\varepsilon}, \Phi) + \sum_{t=1}^T a_t \cdot \left[\sum_{m=1}^{m=3} \varphi_{im,\varepsilon} \cdot \sum_{f=1}^F a_f (1 + \varphi_{i,m}) \cdot \sum_{p=1}^P K_{i,p}(D_{\phi,\varepsilon}, H_{\phi,\varepsilon}, \Phi) + \sum_{m=4}^{m=5} I_{im}(\tau_{i,оч}) \right] = \min ;$$

$$a_t = (1 + E)^{-t} ; a_f = (1 + E)^{-f \cdot t_p} , i = \overline{1, I} , p = \overline{1, P} , t = \overline{1, T} , \quad (2)$$

где t – расчетный год эксплуатации УО; T – срок службы УО, год; принимается равным сроку службы ГРП, $T = 25$ лет; a – коэффициент дисконтирования; f – количество замен p -го элемента в течение срока службы, $f = T/t_p$; t_p – срок службы p -го элемента УО, год; E – норма дисконта, 1/год; принимается равной средней кредитной ставке банка в условиях устойчивой рыночной экономики, $E = 0,12$; $K_{i,p}(D_{\phi,\varepsilon}, H_{\phi,\varepsilon}, \Phi)$ – капиталовложения в изготовление p -го элемента i -го варианта УО, долл.; $D_{\phi,\varepsilon}$, $H_{\phi,\varepsilon}$ – диаметр и высота фильтрующего элемента, м; $\varphi_{i,m}$ – доля отчислений от $K_{i,p}$ на монтаж i -го варианта УО, д.е; Φ – оптимальная величина фактора формы корпуса УО, равная оптимальному отношению его высоты H к диаметру D , то есть $\Phi = H/D$ (рис. 1); $\varphi_{im,\varepsilon}$ – доля годовых отчислений от $K_{i,p}$ на эксплуатацию p -го элемента i -го варианта УО, д.е; $I_{i,m}(\tau_{i,оч})$ – m -й вид эксплуатационных затрат i -го варианта УО, долл./год; $\tau_{i,оч}$ – продолжительность очистки природного газа от крупных твердых частиц до момента достижения величины максимально допустимого значения перепада давления на фильтрующем элементе $\Delta P_{мд}$, для i -го варианта УО, сут.

Система ограничений управляющих параметров целевой функции (1):

$$D_{\phi,\varepsilon,\min} \leq D_{\phi,\varepsilon} \leq D_{\phi,\varepsilon,\max} ; H_{\phi,\varepsilon,\min} \leq H_{\phi,\varepsilon} \leq H_{\phi,\varepsilon,\max} ;$$

$$\Phi_{\min} \leq \Phi \leq \Phi_{\max} ; \tau_{i,оч,\min} \leq \tau_{i,оч} \leq \tau_{i,оч,\max} . \quad (3)$$

Балансовое уравнение математической модели формулируется следующим образом.

Количество твердых частиц в каждый момент времени функционирования i -го варианта УО, равный τ_i , поступивших из входного газопровода, численно равно суммарному количеству твердых частиц, уловленных УО, и поступивших в выходной газопровод, то есть:

$$\sum_{\tau_i=1}^{\tau_i=\tau_{i,оч}} g_{вх,\tau_i} \cdot V = \sum_{\tau_i=1}^{\tau_i=\tau_{i,оч}} G_{\phi,\varepsilon,\tau_i} + \sum_{\tau_i=1}^{\tau_i=\tau_{i,оч}} g_{вых,\tau_i} \cdot V , \quad (4)$$

где τ_i – переменная времени для i -го варианта УО, ч; $\tau_i = 1 \dots \tau_{i,оч}$; $g_{вх,\tau_i}$ – удельное количество ТЧ в природном газе, поступающее из входного газопровода в УО в

момент времени τ_i для i -го варианта, г/м³; V – расчетный часовой расход природного газа, одинаковый для каждого i -го варианта во входном и выходном газопроводах, м³/ч; $G_{\phi.\varepsilon.\tau_i}$ – общее количество твердых частиц, уловленное фильтрующим элементом в момент времени τ_i для i -го варианта УО, г/ч; $g_{\text{вых.}\tau_i}$ – удельное количество твердых частиц, поступающее из УО в выходной газопровод в момент времени τ_i для i -го варианта, г/м³.

Выявим аналитические зависимости для различных элементов капвложений и эксплуатационных затрат, связанных с очисткой газа от крупных ТЧ, в целевой функции (1).

Капитальные вложения в фильтрующий элемент $p = 1$ определяются следующим образом:

$$K_{\phi.\varepsilon}(D_{\phi.\varepsilon}, H_{\phi.\varepsilon}, \Phi) = k_{\phi.\varepsilon} \cdot F_{\phi.\varepsilon}; \quad (5)$$

$$F_{\phi.\varepsilon} = \pi \cdot D_{\phi.\varepsilon} \cdot H_{\phi.\varepsilon}, \quad (6)$$

где $k_{\phi.\varepsilon}$ – удельные капитальные вложения в изготовление ФЭ, долл./м²;

$F_{\phi.\varepsilon}, D_{\phi.\varepsilon}, H_{\phi.\varepsilon}$ – соответственно полная поверхность, м², диаметр и высота ФЭ, м.

Капитальные вложения в корпус установки очистки $p = 2$. Применяемые в настоящее время УО со сварным корпусом характеризуются большими габаритными размерами и металлоемкостью.

Проведенный анализ цен на комплектующие и готовые изделия показывает, что удельный вес стоимости корпуса составляет 75 % от общей величины капвложений в УО. При этом в стоимости корпуса, работающего под избыточным давлением до 1,2 МПа [6], около 50 % составляет стоимость фланцевого соединения (рис. 1).

Капитальные вложения в корпус УО, согласно [6], в значительной степени зависящие от диаметра фильтрующего элемента $D_{\phi.\varepsilon}$ и фактора формы Φ , определяются по формуле:

$$K_{\phi}(D_{\phi.\varepsilon}, H_{\phi.\varepsilon}, \Phi) = k_{o.d} \cdot \rho_{cm} \cdot \pi (D_{\phi.\varepsilon} + 2(\delta + S))^2 (\Phi + 0,69) \cdot (S + \delta_{кор}) + \frac{2\pi k_{\phi.c} \rho_{cm}}{4} \cdot \left[b_{\phi} \left[(D_{\phi.\varepsilon} + 2(\delta + S + e_{\phi} + C_{\phi}))^2 - (D_{\phi.\varepsilon} + 2(\delta + S + e_{\phi}))^2 - nd_o^2 \right] + \left[+ h \left[(D_{\phi.\varepsilon} + 2(\delta + S + e_{\phi} + C_{\phi 1}))^2 - (D_{\phi.\varepsilon} + 2(\delta + S + e_{\phi}))^2 \right] \right] \right], \quad (7)$$

где $k_{o.d}$ – удельные капитальные вложения в изготовление стальных цилиндрической обечайки, эллиптической крышки и днища УО в расчете на единицу их металлоемкости, долл./кг; $k_{\phi.c}$ – удельные капитальные вложения в изготовление фланцевого соединения, состоящего из двух плоских приварных стальных фланцев в расчете на единицу их металлоемкости, долл./кг; ρ_{cm} – плотность стали, кг/м³; δ – расстояние между наружной поверхностью ФЭ и внутренней поверхностью корпуса УО, м; S – толщина стенки цилиндрической обечайки, эллиптиче-

ских крышки и днища корпуса УО, м; Φ – оптимальная величина фактора формы корпуса УО; $\delta_{кор}$ – запас толщины металла на коррозию, м; b_{ϕ} – толщина стального фланца с уплотнительной поверхностью типа «соединительный выступ», м; принимается по ГОСТ 12820-80 при величине рабочего давления P в корпусе УО (рис. 1); e_{ϕ} – нормативная величина конструктивного зазора между внутренней боковой поверхностью фланца и наружной боковой поверхностью обечайки или крышки (рис. 1), м; C_{ϕ} – полная ширина фланца, м, принимается как разность наружного и внутреннего диаметров фланца по ГОСТ 12820-80 при величине рабочего давления P в корпусе УО (рис. 1); h – толщина соединительного выступа фланца с уплотнительной поверхностью типа «соединительный выступ», м, принимается по ГОСТ 12820-80 при величине рабочего давления P в корпусе УО; $C_{\phi 1}$ – полная ширина соединительного выступа фланца, м, принимается как разность наружного диаметра уплотнительного выступа и внутреннего диаметров фланца по ГОСТ 12820-80 при величине рабочего давления P в корпусе УО; n – количество отверстий для болтовых соединений во фланце, шт., принимается по ГОСТ 12820-80; d_o – диаметр отверстий во фланце для болтовых соединений (рис. 1), м, принимается по ГОСТ 12820-80.

Оптимальная величина фактора формы $\Phi = H/D$ (рис. 1), определяется по результатам исследований, приведенных в [6].

Диаметр фильтрующего элемента в формулах (6) и (7) определяется по известному паспортному значению пропускной способности установки очистки, численно равной расчетному расходу газа V , приведенному к нормальным условиям, с учетом предельно допустимой величины скорости течения газа $v_{\phi,э,д}$ через ФЭ, принимаемой при величине избыточного давления P :

$$D_{\phi,э} = \frac{V}{\pi \cdot H_{\phi,э} \cdot P \cdot v_{\phi,э,д} \cdot 3600} \quad (8)$$

Для обеспечения качественной очистки природного газа скорость газового потока, проходящего через ФЭ, ограничивается. В частности, для волокнистых ФЭ с целью предотвращения уноса частиц масла и волокон скорость газового потока не рекомендуется повышать свыше 2,5 м/с [4, 5, 8]. Максимально допустимый перепад давления газа на волокнистом ФЭ составляет $\Delta P_{мд} = 10\,000$ Па [8, 9].

Для фильтрующих элементов сетчатого типа унос его материала и крупных ТЧ предотвращается конструкцией, поскольку ФЭ выполнен, согласно ГОСТ 6613-86, из металлической сетки с нормируемым размером ее квадратных ячеек. Скорость газового потока здесь лимитируется перепадом давления на сетке, который, согласно [8, 9], рекомендуется принимать: перед очередной регенерацией, то есть очисткой ФЭ от крупных ТЧ, – не более 5 000 Па, после очередной регенерации – не более 2 500 Па.

Слагаемое $\varphi_{i,m} \cdot \sum_{p=1}^P K_{i,p}(D_{\phi,\varepsilon}, H_{\phi,\varepsilon}, \Phi)$ в целевой функции (1) представляет

собой дополнительные капитальные вложения в монтаж p -го элемента для каждого i -го варианта установки очистки, связанные с установкой 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 $K_{i,p}$ на монтаж i -го варианта УО.

Слагаемое $\sum_{t=1}^T a_t \cdot \sum_{m=1}^{m=3} \varphi_{im,\varepsilon} \cdot \sum_{f=1}^F a_f (1 + \varphi_{i,m}) \cdot \sum_{p=1}^P K_{i,p}(D_{\phi,\varepsilon}, H_{\phi,\varepsilon}, \Phi)$ в целевой

функции (1) представляет собой эксплуатационные затраты, связанные с капитальным ($m = 1$), текущим ($m = 2$) ремонтом, плановым и текущим осмотром ($m = 3$), и определяются как доля годовых отчислений на эксплуатацию от основных и дополнительных капитальных вложений для i -го варианта УО:

Эксплуатационные затраты, связанные с регенерацией фильтрующего элемента, то есть с удалением твердых частиц с поверхностей и толщи фильтрующего материала, с его пополнением и пропиткой маслом, определяются по формуле:

$$\sum_{t=1}^T a_t \cdot \sum_{m=4}^{m=5} I_{im}(\tau_{i,oc}) = \sum_{t=1}^T a_t \cdot (I_{i4} + I_{i5}) \frac{\tau_{zod}}{\tau_{i,oc}}, \quad (9)$$

где τ_{zod} – число суток в году; I_{i4} – затраты на очистку наружной поверхности и толщи слоя ФЭ от твердых частиц, долл./год; I_{i5} – затраты, связанные с пополнением фильтрующего материала и пропиточного масла, долл./год.

Затраты на очистку наружной поверхности и толщи слоя ФЭ от твердых частиц определяются по формуле:

$$I_{i4} = \tau_{i,4} \cdot n_{i,4} \cdot c_i, \quad (10)$$

где $\tau_{i,4}$ – продолжительность удаления ТЧ с наружной поверхности и толщи слоя ФЭ, ч; $n_{i,4}$ – количество работников эксплуатационной организации, осуществляющих очистку наружной поверхности и толщи слоя ФЭ от ТЧ, чел.; c_i – часовая зарплата одного работника эксплуатационной организации, осуществляющего очистку или регенерацию фильтрующего элемента, долл./ч·чел.

Затраты, связанные с пополнением фильтрующего материала и пропиточного масла, определяются по формуле:

$$I_{i5} = \tau_{i,5} \cdot n_{i,5} \cdot c_i, \quad (11)$$

где $\tau_{i,5}$ – продолжительность операции по пополнению фильтрующего материала и пропиточного масла в фильтрующем элементе, ч; $n_{i,5}$ – количество работников эксплуатационной организации, осуществляющих операции по пополнению фильтрующего материала и пропиточного масла в фильтрующем элементе, чел.

Следует отметить, что математическая модель (1) - (11) разработана для общего случая, не зависящего от материала фильтрующего элемента.

Обоснование предлагаемого типа системы грубой очистки осуществлялось в детерминированной постановке путем минимизации целевой функции (1) во временной динамике, охватывающей период от начала сооружения до конца периода эксплуатации, с учетом различия в сроках службы отдельных элементов в течение срока службы всей системы и оптимального соотношения высоты корпуса установки очистки H к ее диаметру D , согласно [6].

За год сооружения всех конкурирующих вариантов УО принят 2014 год. Продолжительность эксплуатации сравниваемых вариантов, с учетом морального и физического износов, принята равной назначенному сроку службы ГРП, то есть $T = 25$ лет.

Для технико-экономического сравнения были отобраны варианты, обеспечивающие одинаковую пропускную способность, численно равную расчетному расходу газа V , характерному для УО со сварным корпусом. Сравнение конкурирующих вариантов осуществляется с учетом их сопоставимости, согласно [4], и, в первую очередь, по назначению.

В настоящее время в ГРП отечественных и зарубежных конструкций получили распространение варианты УО на основе: металлопористого ФЭ, $i = 1$; волокнистого ФЭ, $i = 2$; сетчатого ФЭ, $i = 3$.

В результате проведенного анализа с учетом требований безопасности, надежности и экономичности были выявлены следующие преимущества и недостатки каждого из трех применяемых в ГРП вариантов УО.

1. Вариант УО на основе металлопористого ФЭ ($i = 1$).

Преимуществами этого варианта УО являются возможность работы при повышенных температурах, в условиях агрессивной среды, высокая прочность и устойчивость, способность выдерживать большие перепады давления и газодинамические удары. Недостатки металлопористого ФЭ связаны со сложностью очистки и регенерации, низкой удельной пропускной способностью и относительно высокой стоимостью [1, 10], что существенно снижает объем его использования в системах газораспределения.

2. Вариант УО на основе волокнистого ФЭ ($i = 2$).

Волокнистые фильтрующие элементы характеризуются способностью комплексного улавливания мелких твердых частиц и жидких частиц тяжелых углеводородных фракций, воды, смолистых веществ с высокой степенью фильтрации, не менее 99,8 %. При этом волокнистые ФЭ работают в стационарном режиме самоочищения от жидких частиц за счет их укрупнения в капли и образования жидкой пленки, удаляющейся по мере накопления из слоя фильтрующего материала в виде струек или крупных капель, перемещающихся внутри слоя и с его тыльной стороны под действием силы тяжести и капиллярных сил [10].

В то же время унос фильтрующего материала при повышении скорости потока газа, необходимость периодической пропитки фильтрующего материала

маслом и сравнительно короткий срок службы существенно осложняют эксплуатацию УО на основе волокнистого ФЭ.

3. *Вариант УО на основе сетчатого ФЭ ($i = 3$)* предотвращает пропуск только крупных твердых частиц с размерами, превышающими 0,12 мм, исходя из минимального сортамента плетеной фильтрующей сетки, выпускаемой промышленными предприятиями. В связи с этим, в системах тонкой очистки газа данный вариант не нашел применения.

В то же время, его использование в системах грубой очистки газа обладает следующими преимуществами [1, 8]: возможностью высокоскоростной очистки газа за счет отсутствия уноса фильтрующего материала и его высокой устойчивости к истиранию; малой трудоемкостью и продолжительностью времени удаления твердых частиц из фильтрующего элемента; исключением операций по пропитке фильтрующего материала маслом и по удалению его излишков; отсутствием необходимости периодического вскрытия кассет ФЭ и их пополнения фильтрующим материалом.

Таким образом, варианты на основе металлопористых, волокнистых и сетчатых ФЭ получили применение в системах газораспределения, характеризуются рядом преимуществ и недостатков, в связи с чем выбор одного из них для использования в системах грубой очистки природного газа от крупных ТЧ требует проведения детального технико-экономического обоснования.

С целью количественной оценки результатов исследований, согласно формуле (1), были проведены соответствующие расчеты при следующих исходных данных: пропускная способность V , численно равная расчетному расходу газа, изменяется для УО со сварным корпусом в диапазоне от 1 000 до 120 000 м³/ч; избыточное давление в корпусе $P = 1,2$ МПа [1]; срок службы установки грубой очистки $T = 25$ лет; продолжительность изготовления и монтажа каждой из конкурирующих УО составляет 0,6 года; начало строительства – 2014 год; период эксплуатации УО – 2014 ÷ 2039 годы; номер шага $t = 1, 2, \dots, 25$; норма дисконта (кредитная ставка банка) $E = 0,12, 1/\text{год}$; удельные капвложения в фильтрующий элемент $K_{ф.э}$, долл./м², принимались согласно [11]; удельные капитальные вложения в изготовление стальных цилиндрической обечайки, эллиптических крышки и днища установок очистки $K_{о.д}$, в расчете на единицу их металлоемкости, долл./кг, принимались согласно [11 - 14]; удельные капитальные вложения в изготовление фланцевого соединения, состоящего из двух плоских приварных стальных фланцев, в расчете на единицу их металлоемкости $K_{ф.с}$, долл./кг, принимались согласно [14]; доля отчислений от капвложений на монтаж i -го варианта установок очистки $\varphi_{i,m} = 0,14$ д.е. [3, 15]; доля годовых отчислений от K_{ip} на эксплуатацию i -го варианта УО, связанных с капитальным ($m = 1$), текущим ($m = 2$) ремонтами и обслуживанием ($m = 3$), $\varphi_{im.э} = 0,03$ д.е. [16 - 18]. Срок службы фильтрующего элемента составляет в варианте УО на основе: металлопористого ФЭ $t_{p=1} = 4$ года

($i = 1$) [10], соответственно количество замен $f = 6$; волокнистого ФЭ $t_{p=1} = 6$ лет ($i = 2$) [10], количество замен $f = 4$; – сетчатого ФЭ из плетеной сетки из нержавеющей стали марки НП-2 по ГОСТ 492-73 $t_{p=1} = 25$ лет ($i = 3$), количество замен $f = 0$ [1, 8]. Предельно допустимая скорость течения газа через живое сечение ФЭ при избыточном давлении $P = 1,2$ МПа: – для металлопористого ФЭ – 2,5 м/с, согласно [10]; – для волокнистого ФЭ – 2,5 м/с, согласно [8, 10]; – для сетчатого ФЭ – 25,0 м/с, согласно [1, 8]; количество работников, осуществляющих регенерацию ФЭ, $n_{i,4} = n_{i,5} = 2$ чел. [19] не реже двух раз в год в период проведения технического обслуживания УО, согласно пунктам 5.6.6 и 5.6.9 Правил [20]; часовая зарплата одного работника, осуществляющего регенерацию ФЭ, $c_i = 2,4$ долл./ч [16-18].

Продолжительность удаления твердых частиц с наружной поверхности и в толще слоя ФЭ, $\tau_{i,4}$, согласно [8], складывается:

– для металлопористого ФЭ из времени $\tau_{i,4} = 1,5 + 0,45 = 1,95$ ч, то есть, для очистки поверхности и толщи материала ФЭ от ТЧ, осуществляемой путем промывки в растворителе под давлением – 1,5 ч и повторной установки ФЭ в корпус УО и испытания мест соединений на герметичность – 0,45 ч;

– для волокнистого ФЭ из времени $\tau_{i,4} = 1,1 + 0,45 = 1,55$ ч, то есть, для удаления ТЧ и загрязненного масла с поверхности и в толще слоя ФЭ, осуществляемой путем промывки в растворителе – 1,1 ч, повторной установки ФЭ в корпус УО и испытания мест соединений на герметичность – 0,45 ч;

– для сетчатого ФЭ из времени $\tau_{i,4} = 0,6 + 0,45 = 1,05$ ч, то есть, для удаления ТЧ с поверхности ФЭ, осуществляемой путем промывки в теплой воде – 0,6 ч, повторной установки ФЭ в корпус УО и испытания мест соединений на герметичность – 0,45 ч.

– Продолжительность пополнения фильтрующего материала и пропиточного масла фильтрующего элемента $\tau_{i,5}$, согласно [8, 10], складывается:

– для волокнистого ФЭ из времени $\tau_{i,5} = 0,9 + 0,25 + 0,3 = 1,45$ ч, то есть, для пополнения кассеты новыми волокнами взамен фильтрующего материала, унесенного потоком газа, уплотнения волокон до расчетного уровня – 0,9 ч; пропитки кассеты ФЭ маслом (для усиления фильтрующих свойств волокон), осуществляемой путем опускания кассеты на 6 минут в ванну с маслом с температурой 55...60 °С – 0,25 ч; для подъема кассеты и стекания в течение 5...6 часов излишнего масла; для повторной доставки обслуживающего персонала на объект для установки ФЭ в корпус УО, слива масла в емкость для хранения – 0,3 ч;

– для металлопористого и сетчатого ФЭ $\tau_{i,5} = 0$, поскольку нет потребности в пополнении ФЭ и пропиточного масла.

Падение давления на фильтрующем элементе до максимально допустимой величины $\Delta P_{\text{мд}}$, согласно [8, 9, 20], составляет: для металлопористого и волокнистого ФЭ – 10000Па; для сетчатого ФЭ – 5000Па.

Величина функционирования ФЭ до момента падения давления до максимально допустимой величины $\Delta P_{\text{мд}}$, для металлопористого, волокнистого и сетчатого вариантов УО переводится на стадии обоснования в состав исходных данных и принимается согласно [8, 19] равной $\tau_{i, \text{оч}} = 182$ сут.

При проведении расчетов по выбору типа УО капитальные вложения в корпус системы грубой очистки K_{ϕ} определены по формуле (7) в соответствии с исходными данными, принятыми по ГОСТ 12820-80 и ГОСТ 12815-80. При этом оптимальная величина отношения высоты H корпуса УО к его диаметру D , принималась в соответствии с [6].

Капитальные вложения в фильтрующий элемент приняты равными $K_{\phi, \text{э}} = 0,175 K_{\phi}$ на основании анализа, показывающего, что удельный вес стоимости фильтрующего элемента в общем балансе капвложений в установку грубой очистки составляет в среднем 17,5 %.

Коэффициент дисконтирования капвложений, учитывающий неоднократную замену ФЭ в течение срока службы УО, определен по формуле (2) и составляет: $a_f = 2,4$ для варианта № 1, использующего металлопористый ФЭ со сроком службы $t_p = 4$ года при количестве замен $f = 6$; $a_f = 1,9$ для варианта № 2, использующего волокнистый ФЭ со сроком службы $t_p = 6$ лет при количестве замен $f = 4$; $a_f = 1,0$ для варианта № 3, использующего сетчатый ФЭ со сроком службы $t_p = 25$ лет при количестве замен $f = 0$.

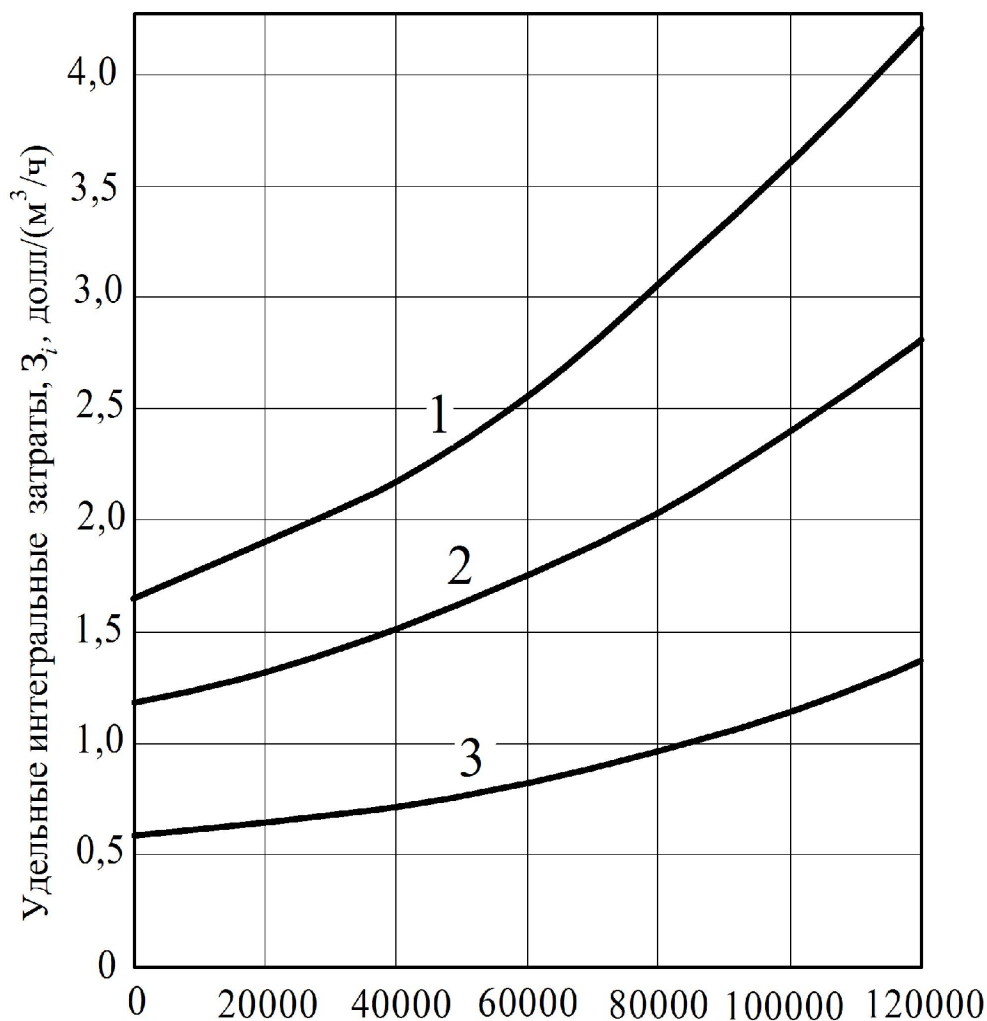
Результаты расчетов по обоснованию экономически целесообразного варианта УО, проведенных согласно математической модели (1) - (11) представлены на графике (рис. 2).

Из графика видно, что величина экономии от применения УО с сетчатыми ФЭ (линия 3) составляет 74,5 % по сравнению с наиболее близким по экономической эффективности типом установок очистки на основе волокнистых ФЭ (линия 2) для всего типового ряда УО.

При этом дополнительно проведенные расчеты показывают, что величина экономии интегральных затрат:

– за счет возможности повышения скорости в сетчатых УО до максимально возможных значений, вместо 2,5 м/с для волокнистых ФЭ составляет 40,2 %;

– за счет четырехкратного уменьшения количества замен сетчатого по сравнению с волокнистым ФЭ в течение срока службы УО и сокращения продолжительности очистки фильтрующего элемента от крупных твердых частиц составляет 34,3 %.



Пропускная способность V , м³/ч, при избыточном давлении 1,2 МПа

Рис. 2. Зависимость удельных интегральных затрат в конкурирующие варианты систем грубой очистки природного газа от их пропускной способности:

- 1 – вариант на основе металлопористого фильтрующего элемента ($i = 1$);
- 2 – вариант на основе волокнистого фильтрующего элемента ($i = 2$);
- 3 – вариант на основе сетчатого фильтрующего элемента ($i = 3$)

Выводы

1. Разработана математическая модель для выбора оптимального варианта установки грубой очистки природного газа (1)-(11), наиболее полно учитывающая все независимые геометрические параметры, не требующая для получения конечного результата использования ряда промежуточных формул и приемлемая для технико-экономического сравнения всех вариантов установок очистки, применяемых в системах газораспределения. Модель включает в себя структурную схему, целевую функцию интегральных затрат, балансовое уравнение, систему ограничений управляющих параметров и позволяет на базе системного подхода

привести все конкурирующие варианты к единой структуре и учесть динамику развития установок грубой очистки.

2. Детальное сравнение конкурирующих вариантов ($i = 1, i = 2$ и $i = 3$), проведенное согласно разработанной математической модели, показывает, что средняя величина экономии от применения сетчатых фильтрующих элементов составляет 74,5 % по сравнению с наиболее близким по экономической эффективности типом установок очистки на основе волокнистых ФЭ для всего диапазона пропускной способности типового ряда УО.

Литература

1. Промышленное газовое оборудование. 3-е изд., перераб. и доп. Саратов: Газовик, 2003. 624 с.
2. Ляуконис А.Ю. Оптимизация городского газоснабжения. Л.: Недра, 1989. 302 с.
3. Курицын Б.Н. Оптимизация систем теплогасоснабжения и вентиляции. Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 1992. 160 с.
4. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Густов С.В., Желанов В.П. Разработка математической модели по обоснованию типа системы грубой очистки природного газа от твердых частиц и оптимизации ее геометрических и эксплуатационных параметров // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. Вып. 1 (83). С. 148 - 158.
5. 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. 2011. Вып. 1 (83). С. 159 - 167.
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. Вып. 4 (82) С. 145 - 155.
7. 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.
8. Шур И.А. Газорегуляторные пункты и установки. Л.: Недра, 1985. 288 с.
9. СП 42-101-2003. Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб. М.: ГУП ЦПП, 2003. 168 с.
10. Справочник по пыле- и золоулавливанию/ М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

11. Промышленное газовое оборудование. Прайс / Группа компаний «Газовик». URL: <http://www.gazovik-gaz.ru/price> (дата доступа: 15.9.2011).
12. Фильтры газовые. Прайс-лист / ООО «ГАЗМОНТАЖКОМПЛЕКТ». URL: http://www.gazmc.ru/price/price_fg.html ((дата доступа: 20.11.2011).
13. Труба электросварная. Прайс-лист / Пульс цен. URL: <http://msk.pulscen.ru/predl/metal/truba/weldedpipe/36889> (дата доступа: 23.11.2011).
14. Прайс-лист на фланцы стальные. Инжиниринг Технологии.
15. Богуславский Л.Д. Экономика теплогазоснабжения и вентиляции. М.: Стройиздат, 1988. 320 с.
16. Примерный прейскурант на услуги газового хозяйства по техническому обслуживанию и ремонту газораспределительных систем / Утвержден приказом ОАО «Росгазификация» от 20 июня 2001г. № 35; введен в действие с 1 июля 2001 г. Саратов: ОАО «Гипрониигаз», 2001. 120 с.
17. Налоговый кодекс Российской Федерации N 117-ФЗ от 05.08.2000. Часть вторая. Принят ГД РФ 19.07.2000. (В редакции ФЗ от 28.12.2010. № 425-ФЗ) М.: 2010. 411с.
18. Классификация основных средств, включаемых в амортизационные группы. Утверждено постановлением Правительства РФ от 1 января 2002 г. №1 (В редакции постановления Правительства РФ от 10. 12. 2010 г. №1011.) М., 2010. 34с.
19. ОСТ 153-39.3-051-2003. Техническая эксплуатация газораспределительных систем. Основные положения. Газораспределительные сети и газовое оборудование зданий. Резервуарные и баллонные установки. Саратов: Три А, 2003. 140 с.
20. ПБ 12-529-03. Правила безопасности систем газораспределения и газопотребления. М.: ГУП НТЦ ПБ Госгортехнадзора России, 2003. 200 с.

MATHEMATICAL MODEL FOR CHOICE OF VARIANT OF INSTALLATION ROUGH PEELINGS NATURAL GAS

A.P. Usachev¹, S.V. Gustov

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia
e-mail: ¹usachev-ap@mail.ru

Abstract. *Mathematical model is brought for choice of variant of installation rough peelings natural gas, most packed taking into account all independent geometric parameters, not requiring for reception of final result of use row intermediate molded and acceptable for technician – an economic comparison all variant installation peelings applicable in system gas distribution. Model consists of structured scheme, target function of integral expenses, balance equation, system of restrictions controlling parameter and allows on base of system approach to bring all rival variants to united structure and take into account speaker of development of system rough peelings.*

Keywords: *natural gas, large hard particles, system rough peelings, control, safety and protective accessories, gas regulating post, target function, braided metallic net, filtering element, mathematical model, choice, variant*

References

1. Promyshlennoe gazovoe oborudovanie: Spravochnik (Industrial gas equipment: Reference book). 3 ed. Saratov: Gazovik, 2010. 624 p.
2. Lyaukonis A.Yu. Optimizatsiya gorodskogo gazosnabzheniya (Optimization of urban gas supply). Leningrad, Nedra, 1989. 302 p.
3. Kuritsyn B.N. Optimizatsiya sistem teplogazosnabzheniya i ventilyatsii (Optimization of heat supply and ventilation system). Saratov, SarTU, 1992. 160 p.
4. Usachev A.P., Shuraitis A.L., Gustov S.V., Zhelanov V.P. Razrabotka matematicheskoi modeli po obosnovaniyu tipa sistemy gruboi ochistki prirodno go gaza ot tverdykh chastits i optimizatsii ee geometricheskikh i ekspluatatsionnykh parametrov (Development of a math model substantiating the type of the system of natural gas primary cleaning from solids and optimizing its geometric and operation parameters), *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2011, Issue 1 (83), pp. 148 - 158.
5. Usachev A.P., Shuraitis A.L., Gustov S.V., Zhelanov V.P. Obosnovanie tipa sistemy ochistki prirodno go gaza, ustanavlivaemoi pered reguliruyushchei, predokh-ranitel'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 (83), pp. 159 - 167.
6. Usachev A.P., Shurayts A.L., Gustov S.V., Sherstyuk P.V. (Development mathematical model for filter form optimization, cabinet tybe gaz regulating points placed) *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of*

gathering, treatment and transportation of oil and oil products, 2010, Issue 4 (82), pp. 145 - 155.

7. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh proektov (Methodical recommendations for the evaluation of investment projects). Moscow, 1999. 201 p.

8. Shur I.A. Gazoregulyatornye punkty i ustanovki (Gas regulating posts and installations). Leningrad, Nedra, 1985. 288 p.

9. SP 42-101-2003. Obshchie polozheniya po proektirovaniyu i stroitel'stvu gazoraspredelitel'nykh sistem iz metallicheskiykh i polietilenovykh trub (General provisions on design and construction of the gas-distribution systems composed of metal and polyethylene pipes). Moscow, GUP TsPP, 2003. 168 p.

10. Birger M.I., Val'dberg A.Yu., Myagkov B.I., Padva V.Yu., Rusanov A.A., Urbakh I.I. Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu (Handbook of dust and ash entrapment). 2 ed. Moscow, Energoatomizdat, 1983. 312 p.

11. Promyshlennoe gazovoe oborudovanie. Prais (Industrial gas equipment. Price list) / Group of companies "Gazovik". URL: <http://www.gazovik-gaz.ru/price> (last accessed 15.9.2011).

12. Fil'try gazovye. Prais-list (Gas filters. Price list) / Gazmontazhkomplekt. URL: http://www.gazmc.ru/price/price_fg.html (last accessed 15.09.2011).

13. Truba elektrosvarnaya. Prais-list (Electrically welded pipes. Price list) / Pul's tsen. URL: <http://msk.pulscen.ru/predl/metal/truba/weldedpipe/36889> (last accessed 23.11.2011).

14. Flantsy stal'nye. Prais (Steel flanges. Price list) / Inzhiniring Tekhnologii.

15. Boguslavskii L.D. Ekonomika teplogazosnabzheniya i ventilyatsii (Economics of heat and gas supply and ventilation systems). Moscow, Stroiizdat, 1988. 320 p.

16. Primernyi preiskurant na uslugi gazovogo khozyaistva po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu gazoraspredelitel'nykh sistem (Gas service indicative price list for the maintenance and repair of gas distribution systems). Saratov, Gipronigaz, 2001. 120 p.

17. Tax Code of Russian Federation from August 5, 2000 of No. 117-FZ (part second). Accepted by the State Duma on July 19, 2000, Moscow, 2010. 411 p.

18. Order of the Government of the Russian Federation from January 1, 2002 of No. 1. About classification of the property, plant and equipment included in depreciation groups (as of December 10, 2010). Moscow, 2010. 34 p.

19. OST 153-39.3-051-2003. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya gazoraspredelitel'nykh sistem. Osnovnye polozheniya. Gazoraspredelitel'nye seti i gazovoe oborudovanie zdanii. Rezervuarnye i ballonnye ustanovki (Gas-distribution system technical maintenance. Main regulations. Gas-distribution network and gas equipment. Tank and balloon plants). Saratov, Tri A, 2003. 140 p.

20. PB 12-529-03. Pravila bezopasnosti sistem gazoraspredeleniya i gazopotrebleniya (Safety rules for gas distribution and gas consumption systems). Moscow, 2003. 200 p.