

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТИРОВКОЙ ГАЗА ПО ТРУБОПРОВОДАМ ПУТЕМ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ

Р. А. Штыков¹, Н. К. Юрков²

¹ Муромский институт Владимирского государственного университета, Муром, Россия

² Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ ipmrroman@yandex.ru, ² yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для определения концентраций примесей в газе, который транспортируется по трубопроводу, используют специальные приборы, что вызывает удорожание транспортировки газа на приобретение этих приборов, их установку и затраты на их обслуживание. Цель – сократить расходы, используя более эффективный способ определения концентраций примесей с помощью специально разработанной математической модели, которая позволит получать данные в автоматизированном процессе вычисления. *Материалы и методы.* Исследование гидравлических закономерностей, которые способствуют установлению оптимальных и надежных характеристик системы газоснабжения. *Результаты.* Получены гидравлические закономерности, которые определяют осредненные изменения концентраций примесей в газе по рабочему сечению потока. Показана динамика изменений давления в трубе газа при учете изменения гидравлического сопротивления на трение. Разработаны балансовые уравнения и описаны гидравлические зависимости с целью нахождения концентраций примесей по всему объему трубопровода. Показаны изменения давления газа при начале и остановке работы насосных станций в системе газоснабжения. *Выводы.* Таким образом, определяя концентрации примесей в газе при его транспортировке, можно минимизировать нарушения гидравлического режима его работы, сократив потери всех мощностей более, чем в 12 раз от установленных проектных показателей.

Ключевые слова: газопровод, газ, управление, оптимизация, примеси, концентрация

Для цитирования: Штыков Р. А., Юрков Н. К. Оптимизация управления транспортировкой газа по трубопроводам путем анализа динамики изменения концентрации примесей // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 87–92. doi:10.21685/2307-4205-2021-3-11

OPTIMIZATION OF GAS TRANSPORT MANAGEMENT BY PIPELINES BY ANALYSIS OF DYNAMICS OF CHANGE OF CONCENTRATION OF IMPURITIES

R.A. Shtykov¹, N.K. Yurkov²

¹ Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia

² Penza State University, Penza, Russia

¹ ipmrroman@yandex.ru, ² yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* To determine the concentration of impurities in the gas that is transported through the pipeline, special devices are used, which makes gas transportation for the purchase of these devices more expensive to install and their maintenance costs. The goal is to reduce costs by using a more efficient way to determine the concentration of impurities using a specially developed mathematical model that will allow you to obtain data in an automated calculation process. *Materials and methods.* The study of hydraulic patterns that contribute to the establishment of optimal and reliable characteristics of the gas supply system. *Results.* Hydraulic patterns are obtained that determine the averaged changes in the concentrations of impurities in a gas over the working cross section of the flow. The dynamics of changes in pressure in a gas pipe is shown taking into account changes in hydraulic resistance to friction. Balance equations are developed and hydraulic dependencies are described with the aim of finding impurity concentrations over the entire volume of the pipeline. The changes in gas pressure at the start and stop of the pumping stations in the gas supply system are shown. *Conclusions.* Thus, by determining the concentration of impurities in the gas during its transportation, it is possible to minimize violations of the hydraulic mode of its operation, reducing the loss of all capacities by more than 12 times from the established design indicators.

Keywords: gas pipeline, gas, control, optimization, impurities, concentration

For citation: Shtykov R.A., Yurkov N.K. Optimization of gas transport management by pipelines by analysis of dynamics of change of concentration of impurities. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):87–92. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-3-11

Для определения примесей в газе, транспортируемого по трубопроводу, используют экспресс-методы, которые заключаются в использовании специальных приборов, что вызывает удорожание транспортировки газа при установке этих приборов и затраты на их обслуживание. Наиболее эффективные способы – это косвенные методы, которые позволяют получать данные в автоматизированном процессе вычисления. Один из таких эффективных способов описывается в статье.

При гидравлическом моделировании движения газа по газопроводу, с учетом потери давления из-за шероховатости труб, необходимо использовать критерии, которые учитывают внешние воздействия [1]. Данные критерии вводятся, когда действуют силы гравитации и эти факторы имеют решающее значение при движении газа. В системе подачи газа процесс движения происходит под воздействием вынужденного гидродинамического давления, создаваемого насосной станцией, и очевидного сопротивления, вызванного засорением трубопровода. Продукты засора внутри трубопровода могут создать условия для резкого увеличения гидравлического сопротивления трубопровода, что приводит к противодействию давления, которое нагнетается насосной станцией, и оно будет зависеть от противоположного эффекта трения. Рассмотрим давление газа в трубопроводе. Газ с концентрацией примесей $c_{\text{пр}}$ и объемом W_0 транспортируется через трубу радиусом $R_{\text{пр}}$, поступает в цилиндрическую трубу с определенным радиусом R_0 , смешивается уже с имеющимся газом в этом объеме трубы и возникает дополнительная концентрация примеси c_0 . Газ, находящийся в трубе имеет более высокую концентрацию примесей $c(t)$, чем вновь поступивший. В этот момент $t = t_1 c_0 > c(t)$ концентрация примесей достигает некоторого значения c^* .

Рассмотрим динамику изменения концентрации примесей при подаче газа в систему насосной станцией с переменным режимом работы, принимая обозначения: $Q_{\text{пр}}(t)$ – подача насосной станцией газа с концентрацией примесей – $c_{\text{пр}}$; наличие примесей на единицы объема воды на выходе из насосной станции – $c_{\text{мин}}$. Подача газа осуществляется в приемный трубопровод цилиндрической формы с конечным объемом и имеет радиус R и длину L . В момент остановки насосной станции $t_0, (t = t_0)$ на рассматриваемом участке газопровода находится газ с объемом $W_0(t_0) = \pi R^2 L$ с концентрацией примесей – c_0 и отсутствует приток нового газа, т.е. $Q_{\text{пр}}(t \leq t_0) = 0$ (также при $t = t_0, Q_{\text{пр}}(t_0) = 0$).

С началом работы насосной станции или при $t = t_0$ в газопровод начинает поступать газ с расходом $Q_{\text{пр}}(t)$ и с концентрацией $c_{\text{пр}}$, где $c_{\text{пр}} < c_0$. В процессе механического перемешивания в газопроводе формируется газ с концентрацией $c(t)$, для которой имеет место неравенство $c_{\text{пр}} < c(t) < c_0$.

Рассматриваем задачу, при которой в газопроводе с диаметром d и длиной L имеется газ с большими концентрациями примесей ($c_0 > c_n$). Объем газа до момента $t \leq t_0$ имеет концентрации примесей

$$W_n^{(в)} = W_0(1 - c_0) \text{ и } W_n^{(с)} = W_0 c_0, \quad (1)$$

где $W_0 = \frac{\pi}{4} d^2 L$.

С момента $t = t_0$ начинается поступление газа с расходом $Q_{\text{пр}}(t)$ и концентрацией примесей $c_{\text{пр}}$. Для достижения газа приемлемого качества должно выполняться условие $c_{\text{пр}} < c_0$.

В газопровод при $t_0 \leq t$ поступает газ с концентрацией примесей $c_{\text{пр}}$ и секундным расходом $Q_{\text{пр}}(t)$. Тогда за время dt в газопровод поступает газ с объемом $dW_{\text{пр}} = Q_{\text{пр}} dt$.

Уравнение баланса объема газа и концентрации примесей за время dt можно описать равенствами

$$dW_{\text{пр}}^{(e)} = Q_{\text{пр}}(1 - c_{\text{пр}})dt, dW_{\text{пр}}^s = Q_{\text{пр}}c_{\text{пр}}dt. \quad (2)$$

Откуда общий объем газа с примесями в газопроводе выражается уравнением [2]

$$W(t) = W_0 + \int_0^t Q_{\text{пр}} dt. \quad (3)$$

А объем газа, необходимого для подачи в газопровод до достижения газа приемлемого качества, можно определить

$$W^e(t^*) = W_0(1 - c_0) + \left[\int_{t_0}^{t^*} Q_{\text{пр}}(t) dt \right] (1 - c_{\text{пр}}), \quad (4)$$

$$W^s(t^*) = W_0c_0 + \left[\int_{t_0}^{t^*} Q_{\text{пр}}(t) dt \right] c_{\text{пр}}. \quad (5)$$

Из уравнений (3) и (5) зависимости можно определить динамику изменения концентрации примесей в газопроводе с учетом притока нового газа

$$c(t) = \frac{W^{(s)}(t)}{W(t)} = \frac{W_0c_0 + \int_{t_0}^t Q_{\text{пр}}(t)c_{\text{пр}}dt}{W_0 + \int_{t_0}^t Q_{\text{пр}}dt}. \quad (6)$$

Зависимость (6) дает основание для получения динамики изменения объема газа с концентрацией примесей, происходящие в процессе механического перемешивания. Из (6) следует, что в момент $t_0 < t$ концентрация примесей в газе уменьшается и в момент $t = t^*$ достигает концентрации c^* , где $c^* < c_{\text{пр}} < c_0$, с этого момента и начинается подача газа в сеть. При этом величина притока газа и величины его оттока равны

$$Q_{\text{вых}}(t) = Q_{\text{пр}}(t) = Q^*(t), \quad (7)$$

т.е. объем газа в газопроводе остается постоянным.

Рассмотрим задачу, в момент $t > t^*$ с учетом притока и оттока газа, когда в газопровод поступает газ с концентрацией $c_{\text{пр}}^*$ и расходом $Q_{\text{пр}}^*$, тогда количество поступающего нового газа будет равным

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{пр}}^{*B}(t) &= Q_{\text{пр}}^*(1 - c_{\text{пр}}^*)_j \\ W_{\text{пр}}^{*3}(t) &= Q_{\text{пр}}^*c_{\text{пр}}^* \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Тогда в газопроводе количество газа и концентрация примесей в момент t^* определяется равенствами

$$W^B(t^*) = W_0(1 - c_0) + \left[\int_{t_0}^{t^*} Q_{\text{пр}}(t) dt \right] (1 - c_{\text{пр}}), \quad (9)$$

$$W^{(s)}(t^*) = W_0c_0 + \left[\int_{t_0}^{t^*} Q_{\text{пр}} dt \right] c_{\text{пр}}. \quad (10)$$

Для случая данного газопровода соблюдается равенство: $Q_{\text{вых}}(t^*) = Q_{\text{пр}}^*(t)$.

Для условия баланса расходов газа принимаем и условие баланса концентрации примесей $c_{\text{вых}}(t^*) \equiv c^* = \text{const.}$

Тогда объем газа с концентраций примесей на выходе из газопровода будет равен

$$W_{\text{вых}}^{(g)} = \int_{t^*}^t Q_{\text{пр}}^*(t)(1-c^*)dt, \quad (10)$$

$$W_{\text{вых}}^{(s)} = \int_{t^*}^t Q_{\text{пр}}^*(t)c^*dt. \quad (11)$$

Изменения концентрации примесей в газопроводе $c_2(t)$ определяются из следующих балансовых уравнений [3]:

$$W_{\text{водт}}^{(b)} = W^{(b)}(t^*) + W_{\text{пр}}^{(b)} - W_{\text{выт}}^{(b)} = W_0(1-c_0) + (1-c_{\text{пр}}) \int_{t_0}^t Q_{\text{пр}}(t)dt - (1-c^*) \int_{t_0}^t Q_{\text{от}}(t)dt; \quad (12)$$

$$W_{\text{водт}}^{(s)} = W^{(s)}(t^*) + W_{\text{пр}}^{(s)} - W_{\text{выт}}^{(s)} = W_0c_0 + \int_{t_0}^t Q_{\text{пр}}(t)c_{\text{пр}}dt - c_{\text{пр}}^* \int_{t_0}^t Q_{\text{от}}^*(t)dt. \quad (13)$$

Откуда определяется концентрация примесей в газопроводе:

$$c_2t = \frac{W^{(s)}}{W^{(s)} + W^{(g)}} = \frac{W^{(s)}}{W(t_1) + \int_{t^*}^t Q_{\text{пр}}^*(t)dt - \int_{t^*}^t Q_{\text{от}}^*(t)dt}. \quad (14)$$

Или изменение концентрации примесей в газопроводе можно переписать в виде

$$c_2(t) = \frac{W^{(s)}(t^*) + W_{\text{пр}}^{(s)} - W_{\text{выт}}^{(s)}}{W(t^*)} \quad (15)$$

или

$$dc(t) = c_2(t) - c_1(t) = \frac{W_2(t) - W_1}{W(t)} = 0, \quad (16)$$

откуда получаем, что при $t > t^*$ должна быть $c_2(t) = c_1(t) = c(t) = c^*$ [3] и обеспечивается регулярная подача газа. При подаче газа в газопровод с давлением P происходит изменение объема газа в нем.

Принимая $\frac{dW}{dp} = -\beta_w W$, теперь рассмотрим задачу об изменении давления газа в газопроводе,

где β_w – коэффициент сжимаемости газа, находим $dp = -\frac{dW}{W} \cdot \frac{1}{\beta_w}$ – изменение давления в газопроводе с учетом сжимаемости газа. Вводим модуль упругости E_0 , где $E_0 = \frac{1}{\beta_w}$, тогда имеем

$dp = -E_0 \frac{dW}{W}$, откуда находим

$$\frac{dW}{W} = -\frac{dP}{E_0}. \quad (17)$$

Тогда изменение концентрации примесей в газе с учетом модуля его упругости можно определить из зависимости [2]

$$dc(t) = -\frac{c_{\text{пр}}}{E_0} dP. \quad (18)$$

При $\frac{dc(t)}{dt} = -\frac{c_{\text{пр}}}{E_0} \frac{dP}{dt}$, интегрируя по времени (18) с учетом начальных условий $c(t_0) = c_0$ и $P(t_0) = P_0$, получим уравнение для описания динамики концентрации примесей в зависимости от изменения давления газа:

$$c(t) = c_0 - \frac{c_{\text{пр}}}{E_0} [P(t) - P_0] \text{ или } c(t) = 1 - \frac{c_{\text{пр}} P_0}{E_0} \left[\frac{P(t)}{P_0} - 1 \right]. \quad (19)$$

Для моделирования изменения давления, необходимого для получения заданной концентрации примесей в газопроводе, используем зависимость

$$P(t) - P_0 = [c_0 - c(t)] \frac{E_0}{c_{\text{пр}}} = \frac{E_0}{c_{\text{пр}}} \cdot \frac{\int_0^t Q_{\text{пр}}(t) dt}{W_0 + \int_0^t Q_{\text{пр}}(t) dt}. \quad (20)$$

Закономерность изменения давления газа в газопроводе для заданной концентрации примесей описывается уравнением

$$P(t) = P_0 + \frac{E_0}{c_{\text{пр}}} \cdot \frac{\int_0^t Q_{\text{пр}}(t) dt}{W_0 + \int_0^t Q_{\text{пр}}(t) dt}. \quad (21)$$

В уравнениях приняты обозначения: $Q_{\text{пр}}(t)$ – подача в газопроводную сеть, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{пр}}^*(t)$ – величина потребного расхода, $\text{м}^3/\text{с}$; $W_{\text{пр}}^{(в)}$ – объем газа в сети в период остановки подачи газа, м^3 ; $W^{(в)}(t^*)$ – объем газа в сети в момент времени t^* , м^3 ; $W_{\text{пр}}^{(в)}$ – объем притока газа в сеть; $W_{\text{от}}^{(в)}$ – объем оттока из сети; W_0 – объем смеси газа и примесей в сети в момент t_0 ; $c_{\text{пр}}$ – концентрация примесей на единицу объема газа на входе в сеть, $\text{число}/\text{м}^3$; c^* – величина ПДК, $\text{число}/\text{м}^3$; c_0 – концентрация примесей на единицу объема газа, $\text{число}/\text{м}^3$; $W_{\text{пр}}^{(с)}$ – объем смеси газа в сети с началом подачи газа в сеть; $W^{(с)}(t^*)$, $W_{\text{пр}}^{(с)}$, $W_{\text{от}}^{(с)}$ – объемы смеси газа, соответствующие в момент времени t , притока и оттока из сети с началом подачи газа к потребителям ($t^* < t$).

Заключение

Учитывая теорию диффузионного перемешивания газа с примесями в газопроводе, получили: 1) гидравлические закономерности, которые определяют осредненные изменения концентраций примесей в газе по рабочему сечению потока; 2) показывают динамику изменений давления в трубе газа при учете изменения гидравлического сопротивления на трение; 3) разработаны балансовые уравнения и описаны гидравлические зависимости с целью нахождения концентраций примесей по всему объему трубопровода; 4) показаны изменения давления газа при начале и остановке работы насосных станций в системе газоснабжения.

Таким образом, определяя концентрации примесей в газе при его транспортировке, можно минимизировать нарушения гидравлического режима его работы, сократив потери всех мощностей более, чем в 12 раз от установленных проектных показателей.

Список литературы

1. Чугаев Р. Р. Гидравлика. М. : Энергия, 1970. 672 с.
2. Штыков Р. А., Юрков Н. К. Построение стехиометрического уравнения для сложносоставного горючего газа // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 4. С. 92–96.
3. Штыков Р. А., Юрков Н. К. Уточненный алгоритм расчета гидродинамических параметров инженерных газовых сетей // Промышленная энергетика. 2017. № 2. С. 44–47.

References

1. Chugaev R.R. *Gidravlika = Hydraulics*. Moscow: Energiya, 1970:672. (In Russ.)
2. Shtykov R.A., Yurkov N.K. Constructing a stoichiometric equation for a compound combustible gas. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(4):92–96. (In Russ.)
3. Shtykov R.A., Yurkov N.K. Refined algorithm for calculating hydrodynamic parameters of engineering gas networks. *Promyshlennaya energetika = Industrial power engineering*. 2017;(2):44–47. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Роман Александрович Штыков

кандидат технических наук,
доцент кафедры физики и прикладной математики,
Муромский институт
Владимирского государственного университета
(Россия, г. Муром, ул. Орловская, 23)
E-mail: ipmrroman@yandex.ru

Roman A. Shtykov

Candidate of technical sciences, associate professor
of sub-department of physics and applied mathematics,
Murom Institute of Vladimir State University
(23 Orlovskaya street, Murom, Russia)

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 22.05.2021

Поступила после рецензирования/Revised 18.06.2021

Принята к публикации/Accepted 21.09.2021