

УДК: 622.691.4

## УСТАНОВЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ГАЗА В ГАЗОПРОВОДАХ

**Авлакулов Абдимажит Мейлиевич** - старший преподаватель,  
ORCID: 0009-0006-6480-0076, E-mail: [abdimajit.avlakulov@mail.ru](mailto:abdimajit.avlakulov@mail.ru)

Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Узбекистан

***Аннотация.** В условиях установившегося движения возникающие потери напора на трение по длине вызывают ряд характерных особенностей движения реального газа по сравнению с движением по трубам несжимаемых жидкостей. При этом учитывались физические свойства газа, режим движения, температура и вязкость, которые оказывают непосредственное влияние на значение коэффициента эффективности газопровода.*

*В статье приведен анализ методов расчета коэффициента эффективности в зависимости от изменений гидравлического сопротивления, который характеризует пропускную способность трубопровода. Представлен расчет его значения на основе производственных данных для стальных труб. Приведена зависимость потребной мощности для транспорта газа от коэффициента эффективности работы газопроводов.*

*По результатам исследований были выведены уравнения по определению коэффициента гидравлического сопротивления трубопровода при движении газожидкостной смеси по нему и установлена формула, характеризующая эффективность работы системы при соответствующих условиях.*

*Разработанные зависимости способствуют установлению максимальной пропускной способности газопроводов как по магистральным, так и по промышленным трубопроводам.*

**Ключевые слова:** течение газа, газопровод, плотность, мощность, коэффициент эффективности давления.

UDC 622.691.4

## ESTABLISHING THE PIPELINE EFFICIENCY COEFFICIENT FOR GAS TRANSPORTATION IN GAS PIPELINES

**Avlakulov, Abdimazhit Meilievich** - senior lecturer.  
ORCID: 0009-0006-6480-0076, E-mail: [abdimajit.avlakulov@mail.ru](mailto:abdimajit.avlakulov@mail.ru)

Karshi engineering-economics institute, Karshi city, Uzbekistan

***Abstract.** Under conditions of steady motion, the resulting pressure losses due to friction along the length cause a number of characteristic features of the movement of a real gas compared to the movement of incompressible liquids through pipes. At the same time, the physical properties of the gas, the mode of movement, temperature and viscosity, which have a direct impact on the value of the gas pipeline efficiency coefficient, were taken into account.*

*The article provides an analysis of methods for calculating the efficiency coefficient depending on changes in hydraulic resistance, which characterizes the throughput capacity of the pipeline. A calculation of its value is presented based on production data for steel pipes. The dependence of the required power for gas transportation on the efficiency coefficient of gas pipelines is given.*

*Based on the research results, equations were derived to determine the coefficient of hydraulic resistance of a pipeline when a gas-liquid mixture moves through it and a formula was established that characterizes the efficiency of the system under appropriate conditions.*

*The developed dependencies help to establish the maximum throughput of gas pipelines both along main and field pipelines.*

**Key words:** *gas flow, gas pipeline, density, power, pressure efficiency coefficient.*

UO‘K 622.691.4

## GAZ QUVURLARI ORQALI GAZ TASHISHDA QUVUR SAMARADORLIK KOFFEFISIYENTINI O‘RNATISH

**Avlakulov Abdimazhit Meilievich** - katta o‘qituvchi,  
ORCID: 0009-0006-6480-0076, E-mail: [abdimajit.avlakulov@mail.ru](mailto:abdimajit.avlakulov@mail.ru)

Qarshi muhandislik-iqtisodiyot instituti, Qarshi sh., O‘zbekiston

**Annotatsiya.** *Maqolada quvur liniyasining o‘tkazish qobiliyatini tavsiflovchi gidravlik qarshilikning o‘zgarishiga qarab samaradorlik koeffitsiyentini hisoblash usullari tahlili keltirilgan. Uning qiymatini hisoblash po‘lat quvurlar uchun ishlab chiqarish ma'lumotlari asosida taqdim etiladi. Gazni tashish uchun zarur bo‘lgan quvvatning gaz quvurlarining samaradorlik koeffitsiyentiga bog‘liqligi berilgan.*

*Barqaror harakat sharoitida uzunlik bo‘ylab ishqalanish natijasida yuzaga keladigan bosim yo‘qotishlari quvurlar orqali siqilmaydigan suyuqliklarning harakatiga nisbatan haqiqiy gaz harakatining bir qator xarakterli xususiyatlarini keltirib chiqaradi. Shu bilan birga, gaz quvurining samaradorlik koeffitsiyenti qiymatiga bevosita ta'sir qiluvchi gazning fizik xususiyatlari, harakat rejimi, harorati va yopishqoqligi hisobga olindi.*

*Tadqiqot natijalari asosida gaz-suyuqlik aralashmasi quvur orqali harakatlanayotganda quvur liniyasining gidravlik qarshilik koeffitsiyentini aniqlash uchun tenglamalar yaratildi va tegishli sharoitlarda tizimning samaradorligini tavsiflovchi formula o‘rnatildi.*

*Ishlab chiqilgan bog‘liqliklar magistral va dala quvurlari bo‘ylab gaz quvurlarining maksimal o‘tkazuvchanligini o‘rnatishga yordam beradi.*

**Kalit so‘zlar:** *gaz oqimi, gaz quvuri, zichlik, quvvat, bosim samaradorligi koeffitsiyenti.*

### Введение

Природа гидравлического сопротивления для газа и капельной жидкости одна и та же. Поэтому нет принципиальных различий между формулами, определяющими коэффициент гидравлического сопротивления для газопроводов и нефтепроводов [4, 5, 9, 10].

По сравнению с движением капельных жидкостей движение газов характеризуется некоторыми особенностями, обусловленным различием физических свойств капельных и газообразных жидкостей.

В данном случае возникающие потери напора на трение по длине вызывают ряд характерных особенностей движения реального газа по сравнению с движением по трубам несжимаемых жидкостей.

Вследствие низкой вязкости воздуха и относительно больших скоростей режим течения газов в большинстве случаев турбулентный.

С ростом потерь напора на трение давление по длине трубы уменьшается, что ведет к расширению газа и уменьшению его объемной массы.

Вместе с тем в условиях установившегося движения, когда весовой расход остается постоянным вдоль трубы, уменьшение объемной массы вызывает одновременное увеличение средней скорости течения по трубе. Изменяется вдоль трубы и коэффициент трения. При наличии теплообмена будет иметь место и непрерывное изменение температуры газа по длине трубы.

## Методы и материалы

Течение газа в газопроводах описывается уравнениями движения, неразрывности и состояния [1]:

$$\frac{\partial \rho w^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho q \frac{\partial z}{\partial x} - \lambda_{np} \frac{\rho w^2}{2D}, \quad (1)$$

$$c^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial t}, \quad (2)$$

$$pv = zR_g T, \quad (3)$$

где  $\rho, w, p$  – соответственно плотность, линейная скорость и давление газа;  $x$  – координата, совпадающая с осью газопровода и направленная по движению газа,  $t$  – время;  $z$  – коэффициент сжимаемости газа;  $\lambda_{np}$  – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления газопровода;  $D$  – диаметр газопровода;  $c$  – скорость звука в потоке газа;  $v$  – удельный объем;  $R_g$  – газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура газа.

Уравнения (2) и (3) описывают движение, неразрывность и термодинамическое состояние потока газа. Решение системы уравнений (1), (2), (3) определяющей изменение плотности  $\rho$ , линейной скорости  $w, p$  и температуры  $T$  в зависимости от протяженности газопровода  $x$ , приведенного коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda_{np}$  и времени  $t$ , представляет определенные трудности. Для упрощения решения данной системы уравнений рассмотрим установившееся течение газа в газопровode, тогда члены, содержащие параметры, зависящие от времени, будут равны нулю и система уравнений примет вид:

$$\frac{d(\rho w^2)}{dx} = -\frac{dp}{dx} - \rho q \frac{dz}{dx} - \lambda_{np} \frac{\rho w^2}{2D}. \quad (4)$$

$$\frac{d(\rho w)}{dx} = 0 \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что  $\rho w$  – постоянная величина, тогда

$$d(\rho w^2) = \rho w dw = \rho \frac{dw^2}{2}. \quad (6)$$

Подставив выражение (6) и уравнение (4), получим

$$-dp = \rho \lambda_{np} \frac{dx}{D} \frac{w^2}{2} + \rho q dz + \rho d + \frac{w^2}{2}. \quad (7)$$

После анализа уравнения (7) можно сделать вывод о том, что потенциальная энергия сжатого газа в виде потерь давлений расходуется на трение и преодоление сил гидравлических сопротивлений во внутренней полости газопровода, на преодоление потоком газа подъемов трассы при рельефной местности и на возрастание линейной скорости потока по длине газопровода. Член уравнения (7) в правой части учитывают для условий резко пересеченной местности.

Запишем уравнение неразрывности в виде:

$$F \rho w = M_g, \quad (8)$$

где  $F$  – площадь сечения трубы газопровода,  $M_g$  – массовой расход газа в газопровode.

Из уравнения состояния (3) получим плотность

$$\rho = p / (z R_g T). \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в уравнение (8), определим линейную скорость потока:

$$w = M_g z R_g T / (F p). \quad (10)$$

Подставив выражения плотности  $\rho$  и линейной скорости  $W$  в уравнение (7) и после интегрирования, получим

$$p_H^2 - p_k^2 = M_2^2 z R_2 T / F^2 (\lambda_{np}(L/D) + 2 \ln p_H / p_k), \quad (11)$$

где  $L$  – длина расчетного участка газопровода, в начале и конце которого определяют квадрат падения давления  $p_H^2 - p_k^2$ .

Второе слагаемое в скобках  $2 \ln p_H / p_k$  учитывает возрастание кинетической энергии по длине газопровода. Для магистральных газопроводов эта величина по сравнению с  $\lambda_{np}(L/D)$  весьма мала, и в дальнейших выводах она не учитывается [2].

Из уравнения (11) определим приведенный коэффициент гидравлического сопротивления участка газопровода, заменив площадь газопровода через его диаметр:

$$\lambda_{np} = \frac{\pi^2}{16} \frac{p_H^2 - p_k^2}{z R_2 T L M_2^2} D^5. \quad (12)$$

Приведенный (фактический) коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda_{np}$  учитывает коэффициент сопротивления трения или теоретический коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda_{np}$  и гидравлические сопротивления, создаваемые отложениями (загрязнениями) во внутренней полости газопроводов  $\lambda_{3.2}$

$$\lambda_{np} = \lambda_{Tp} + \lambda_{3.2}. \quad (13)$$

Коэффициент сопротивления трения зависит от числа Рейнольдса  $Re$ , диаметра трубы  $D$  и относительной шероховатости  $k/D$ . В настоящее время выведена объединенная формула для определения коэффициента сопротивления трения труб [2]:

$$\lambda_{Tp} = 0,067(158/Re + 2k/D)^{0,2}. \quad (14)$$

При режиме гладкого трения (при малых  $Re$ ) первый член в скобках значительно больше второго, тогда формула (14) принимает вид:

$$\lambda'_{Tp} = 0,1844/Re^{0,2}. \quad (15)$$

При квадратичном режиме, когда второй член в скобках выражения (14) значительно больше первого, уравнение для коэффициента гидравлического сопротивления можно приставить:

$$\lambda''_{Tp} = 0,067(2k/D)^{0,2}. \quad (16)$$

Решая совместно уравнения (12), (13), (14) выведем объединенную формулу для определения коэффициента гидравлического сопротивления, создаваемого отложениями (загрязнениями) в газопроводе:

$$\lambda_{3.2} = \frac{\pi^2}{16} \frac{p_H^2 - p_k^2}{z R_2 T L M_2^2} D^5 - 0,067(158/Re + 2k/D)^{0,2}. \quad (17)$$

Мощность компрессорных станций в условиях внешне адиабатического сжатия, затрачиваемая на компримирование и преодоление гидравлических сопротивлений при транспорте газа,

$$N_e = \int_1^2 \frac{1}{\eta_{ad}\eta_{mex}} M_2 v dp = \frac{M_2}{\eta_{ad}\eta_{mex}} z_m R_2 T_m \ln p_1 / p_2, \quad (18)$$

где  $\eta_{ad}$  – относительный приведенный адиабатический к.п.д., определяемый отношением обратимой адиабатической работы сжатия к эффективной работе сжатия;  $\eta_{mex}$  – механический к.п.д. газоперекачивающих агрегатов;  $z_m, T_m$  – средние соответственно коэффициенты

сжимаемости и температуры при сжатии.  $p_1, p_2$  – соответственно начальное конечное давления при сжатии.

Основной критерий в уравнении (18), определяющий мощность при сжатии, - степень повышения давления в нагнетателях и компрессорах на КС  $\varepsilon_{сж} \rho_2 / \rho_1$ , которая при переходе потенциальной энергии потока в кинетическую равна степени понижения или падения давления  $\varepsilon_{рш}$  в газопроводе:

$$\varepsilon_{сж} = \varepsilon_{рш}. \quad (19)$$

Кроме того, средние потенциальные функции при сжатии на КС и расширении на линейной части газа будем считать равными, т.е.  $\Pi_m = z_m R T_m$ . Решив совместно уравнения (18) и (19) получим:

$$N_e = \frac{m}{\eta_{ад} \eta_{мех}} \frac{z_m^2 R^2 T_m^2}{p_m^2} \frac{\lambda_{np}}{D^5} M^2 L, \quad (20)$$

где  $m$  – коэффициент, учитывающий размерность входящих в уравнение параметров;  $\rho_m$  – среднее давление на рассматриваемом участке,

$$\rho_m = \frac{1}{L} \int_0^L \sqrt{p_H - \frac{p_H^2 - p_K^2}{L}} X dx. \quad (21)$$

После интегрирования получим:

$$P_m = \frac{2}{3} \frac{p_H^3 - p_K^3}{p_H^2 - p_K^2} = \frac{2}{3} \left( p_H + \frac{p_K^2}{p_H + p_K} \right). \quad (22)$$

В уравнении (20) выразим приведенный коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda_{np}$  через коэффициент эффективности работы газопровода:

$$E = M_\phi / M_n = \sqrt{\lambda_{mp} \lambda_{np}}, \quad (23)$$

где  $M_\phi / M_n$  – соответственно фактическая и проектная массовые пропускные способности газопровода.

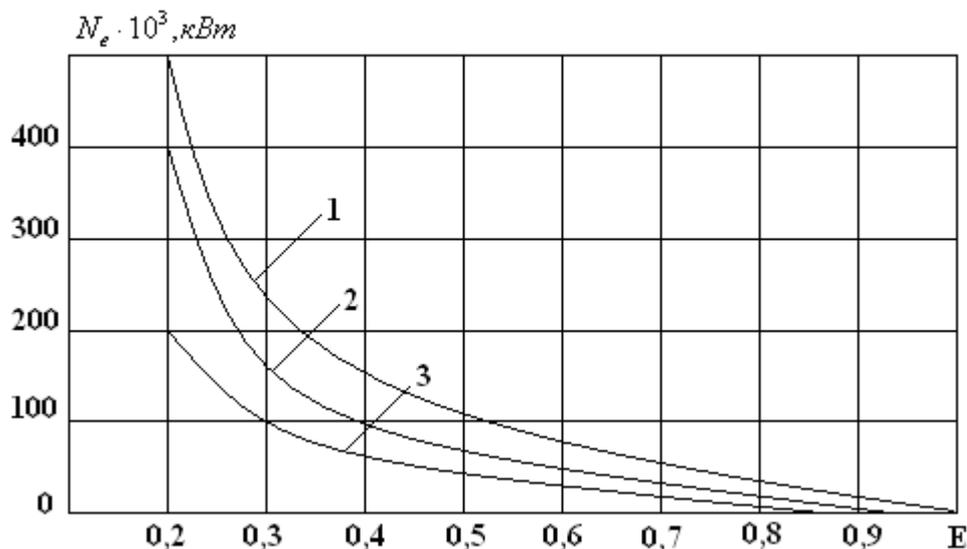
Подставим  $\lambda_{np}$  из выражения (23) в уравнение (20);

$$N_e = \frac{m \lambda_{mp}}{\eta_{ад} \eta_{мех}} \frac{z_m^2 R^2 T_m^2}{p_m^2} \frac{M^3 L}{E^2 D^5}. \quad (24)$$

## Результаты и обсуждения

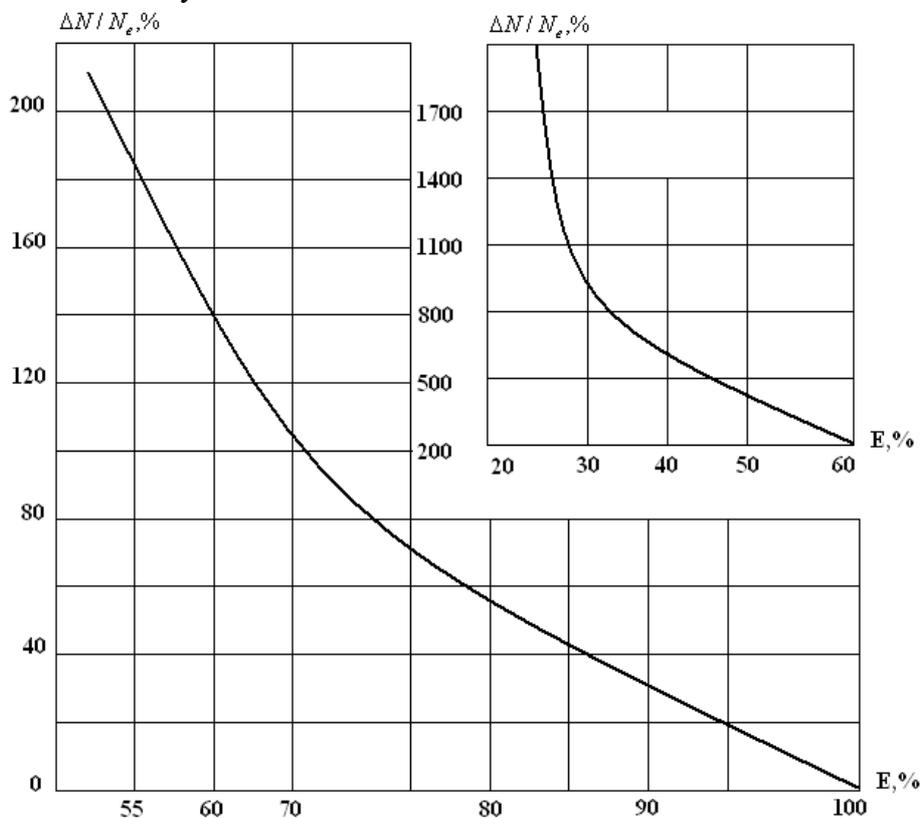
Если считать, что теоретический коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda_{np}$  при рабочих режимах работы газопровода длительное время остается величиной постоянной, то при прочих равных условиях мощность, затрачиваемая на транспорт газа, находится в обратной квадратичной зависимости от коэффициента эффективности работы газопровода  $E$ , оценивающего гидравлическое состояние внутренней полости газопровода, создаваемое отложениями (загрязнениями) в нем (рис.1).

При  $E = 1 \div 0,7$  мощность изменяется примерно прямо пропорционально. Дальнейшее снижение коэффициента эффективности способствует резкому повышению потребной мощности и при  $E = 0,1 \div 0,2$  приближается к бесконечности, т.е. характеризует процесс закупорки газопровода [3, 7, 8].



**Рис.1. Зависимость потребной мощности для транспорта газа от коэффициента эффективности работы газопровода различных диаметров: 1 - 1420 мм; 2 - 1220 мм; 3 - 1020 мм**

Достигнув минимального значения, гидравлическая эффективность в дальнейшем меняется вслед за изменением производительности газопровода и содержания жидкости в газе. Содержание жидкости при нормальной работе установок подготовки газа является величиной достаточно стабильной, и изменения  $E$  происходят в основном за счет изменения производительности газопровода. При нарушении работы установок подготовки газа содержание жидкости меняется скачкообразно, что приводит к резкому снижению эффективности головных участков.



**Рис.2. Относительная характеристика изменения мощности  $\Delta N / N_e$  от коэффициента эффективности  $E$**

Относительная характеристика изменения мощности  $\Delta N/N_e$  от коэффициента эффективности  $E$  не зависит от диаметра газопровода (рис.2).

### Выводы

После анализа полученных результатов можно сделать вывод, что гидравлическое состояние газопроводов в значительной степени влияет на энергозатраты компрессорных станции. Снижение на 10% ( $E = 90\%$ ) коэффициента эффективности линейной части газопровода от проектной ( $E = 100\%$ ) при сохранении его пропускной способности влечет за собой повышение мощности на 20,3% (рис.2). При ( $E = 70\%$ ) и сохранении проектной пропускной способности газопровода мощность компрессорных станций должна быть увеличена на 100%. В реальных условиях на действующих газопроводах резерв мощности на КС ограничен, поэтому снижение гидравлического состояния газопровода отражается и на пропускной способности в сторону ее уменьшения.

### Литература

- [1] Гусейнзаде М.А., Юфин В.А. Неустановившееся движение нефти и газа в магистральных трубопроводах М, Недра 1981
- [2] Бабаджанов Ю.Т. Задача о движении реального газа в трубопроводе // Проблемы механики 2003, №4
- [3] Хамидов А.А. Садуллаев Р, Махкамов М.П. Задача о ламинарном пограничном слое сжимаемого газа в рабочей камере // Проблемы механики. 2005. №6
- [4] Suleymanov, V.A. Peculiarities of gas hydraulics in the pipelines with smooth internal coating [Features of gas hydraulics in pipelines with an internal smooth coating. Gas industry. 2014, no. 11, pp. 91–94. ISSN 0016-5581.
- [5] Базаров О.Ш. Изучение гидродинамических явлений в стационарном процессе трубопроводной транспортировки газа // Инновационные технологии. 2021. № Спецвыпуск 1.
- [6] Чекушина Т.В., Шафеева Г.Х. Инновационные технологии в строительстве и эксплуатации трубопроводного транспорта // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2023. 4(109). А
- [7] Гусейнзаде М. А., Другина Л.И.Петрова О.Н., Степанова М. Ф. Гидродинамические процессы в сложных трубопроводных системах. - Москва: Недра, 1991. - 168 с.
- [8] [Эшев С.С. Бабаджанов Ю.Т. Базаров О.Ш. Бабажанова И.Ю. ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ С ИЗЛОМОМ // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Эшев С.С. \[и др.\]. 2021. 12\(93\).](#)
- [9] <https://studizba.com/lectures/dobycha-resursov/lekcii-po-truboprovodnomu-transportu-gaza/>
- [10] <https://lektsii.org/17-49077.html>