

ОПТИМИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ПРОКЛАДКИ ЛУПИНГА В НАКЛОННЫЙ ГАЗОПРОВОД ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ

Р. А. Штыков¹, А. В. Алексеев², Н. К. Юрков³

¹ Муромский институт Владимирского государственного университета, Муром, Россия

² Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ ipmrroman@yandex.ru, ² antonvladim@mail.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Формулы гидравлического расчета стационарного газодинамического состояния газопровода и газопроводной сети построены только с учетом сопротивления трению. Но не менее важным также считается учитывать различные уклоны трассы, которые способствуют изменению распределения давления в разных направлениях. В данной статье выводятся гидравлические формулы для движения сжимаемой среды по наклонному трубопроводу при различных режимах течения сжимаемой среды. Эти формулы будут использованы при решении задачи об оптимальной прокладке лупинга газовых сетей. *Материалы и методы.* Исследуются гидравлические закономерности лупинга системы газоснабжения, которые способствуют установлению оптимальных характеристик течения газа. *Результаты.* Получены гидравлические закономерности, которые обобщают задачу об оптимальной прокладке лупинга для рельефного газопровода, определен характер изменения давления, пропускной и аккумулирующей способностей участка с лупингом, выделены целесообразные варианты прокладки лупинга, которые согласуются со случаем уклонной трассы. *Выводы.* В зависимости от линейного уклона трассы газопровода выделены условия возрастания, постоянства и убывания значения давления вдоль по потоку и объяснены причины их возникновения.

Ключевые слова: газопровод, газ, управление, оптимизация, лупинг, уклон

Для цитирования: Штыков Р. А., Алексеев А. В., Юрков Н. К. Оптимизация оценки прокладки лупинга в наклонный газопровод при различных режимах течения // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 4. С. 15–20. doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-2

OPTIMIZATION OF THE EVALUATION OF THE LUPING INSTALLATION IN AN INCLINED GAS PIPELINE UNDER VARIOUS FLOW CONDITIONS

R.A. Shtykov¹, A.V. Alekseev², N.K. Yurkov³

¹ Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia

² Volga Region State Transport University, Samara, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ ipmrroman@yandex.ru, ² antonvladim@mail.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* The formulas for the hydraulic calculation of the stationary gas dynamic state of the gas pipeline and the gas pipeline network are constructed only taking into account the friction resistance. But it is also considered important to take into account the different slopes of the route that contribute to a change in the pressure distribution in different directions. In this article, hydraulic formulas are derived for the movement of a compressible medium along an inclined pipeline under various flow regimes of the compressible medium. These formulas will be used to solve the problem of optimal looping of gas networks. *Materials and methods.* Investigation of hydraulic patterns of looping of the gas supply system, which contribute to the establishment of optimal gas flow characteristics. *Results.* Hydraulic patterns have been obtained that generalize the problem of optimal looping wiring for relief, the nature of pressure changes, throughput and storage capacities of the looping section has been determined, and appropriate options for laying looping have been identified, which are consistent with the case of an inclined route. *Conclusions.* Depending on the linear slope of the pipeline route, the conditions of increasing, constant and decreasing pressure values along the stream are highlighted and the reasons for their occurrence are explained.

Keywords: gas pipeline, gas, management, optimization, looping, slope

For citation: Shtykov R.A., Alekseev A.V., Yurkov N.K. Optimization of the evaluation of the luping installation in an inclined gas pipeline under various flow conditions. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(4):15–20. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-4-2

Формулы гидравлического расчета стационарного газодинамического состояния газопровода и газопроводной сети построены только с учетом сопротивления трению [1]. Тем не менее положительный и отрицательный уклоны трассы способствуют изменению распределения давления в разных направлениях. В данной статье выводятся гидравлические формулы для движения сжимаемой среды по наклонному трубопроводу при различных режимах течения сжимаемой среды. Эти формулы будут использованы при решении задачи об оптимальной прокладке лупинга. Известно, что лупинг, согласно работам [2, 3], предназначен для увеличения пропускной способности и надежности элементарного участка газопровода и газопроводной сети в целом. Постараемся оценить лупинг всесторонне.

Обратимся к системе уравнений (1), так как наличие замкнутого контура в системе обуславливает использование аналогов законов Кирхгофа, которые записываются в этом виде

$$\begin{cases} \frac{dp}{\rho} + g dy + \frac{\lambda w^2}{2} \frac{dx}{D} = 0; \\ M = \rho w F = \text{const}, \quad p = Z \rho R T, \end{cases} \quad (1)$$

где M , T , R , Z , $F = \pi D^2 / 4$ и g полагаются постоянными. (В гидравлических расчетах допускается использование постоянного значения Z , которое определяется через средние значения давления и температуры газа в элементарном участке трубопровода.)

Сила инерции в уравнении сохранения импульса из формулы (1) не учтена как в силу ее незначительности при $p \gg p_{\text{атм}}$, так и в силу получаемого неявного решения, что усложняет анализ результатов.

Рассматривается участок с длиной L , диаметром D и эквивалентной шероховатостью k . В начале участка давление газа имеет значение p_A . Массовый расход газа постоянен и составляет M . Сначала определяется значение давления в конце участка для одиночного трубопровода и в случае наличия лупинга, а далее эти показатели сравниваются.

Используя обобщенную формулу Лейбензона для коэффициента сопротивления [4, 5] для пяти режимов течения и исключив ρ и w из формулы (1), получим обыкновенное дифференциальное уравнение относительно давления

$$\frac{dp^{2+n}}{dx} + a p^{2+n} = -\Lambda. \quad (2)$$

Здесь использованы обозначения постоянных

$$a = (2+n) \frac{g \sin \alpha}{ZRT}, \quad \Lambda = (2+n) \frac{\xi ZRT M^{2+n}}{2DF^2}, \quad \xi = \zeta \frac{k^{\theta} (4ZRT)^n}{(\pi v)^n D^{\theta+n}}.$$

Изменение давления по длине газопровода подчиняется закону

$$p^{2+n}(x) = p_A^{2+n} e^{-ax} + \frac{\Lambda}{a} (e^{-ax} - 1). \quad (3)$$

В конце расчетного участка для одиночного провода значение давления составляет

$$\tilde{p}_E^{2+n} = p_A^{2+n} e^{-aL} + \frac{\Lambda}{a} (e^{-aL} - 1).$$

Переходим к расчету участка с лупингом. Задача об оптимальной прокладке лупинга в горизонтальном газопроводе и при развитом турбулентном режиме течения рассмотрена в работе [6]. В обсуждаемом случае задача усложнена тем, что учитывается уклон трассы, а режим течения – произвольный. Для наглядности принято, что длина лупинга составляет половину основного канала (т.е. $L/2$), а остальные гидравлические характеристики основного и вспомогательного каналов одинаковые (рис. 1).

Полагаем, что лупингованный участок начинается с расстояния l от начала основного участка. Так как лупинг и основной канал имеют одинаковые характеристики, то исходный расход газа M между параллельными каналами распределяется по равным частям $M/2$.

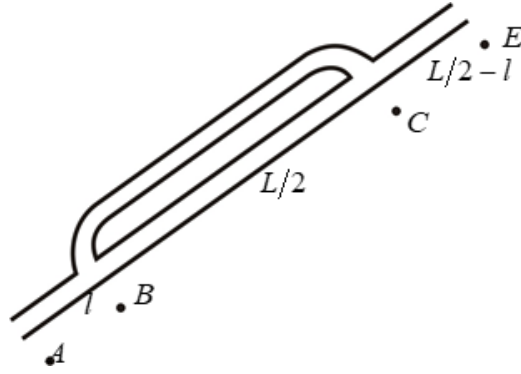


Рис. 1. Оценка целесообразности прокладки лупинга

С привлечением решения (3) и аналогов закона Кирхгофа рассчитываются значения давления в точках B , C и E :

$$\begin{aligned} p_B^{2+n} &= p_A^{2+n} e^{-al} + \frac{\Lambda}{a} (e^{-al} - 1), \\ p_C^{2+n} &= p_B^{2+n} e^{-aL/2} + \frac{\Lambda}{2^{2+n} a} (e^{-aL/2} - 1), \\ p_E^{2+n} &= p_C^{2+n} e^{-a(L/2-l)} + \frac{\Lambda}{a} (e^{-a(L/2-l)} - 1). \end{aligned}$$

Исключив промежуточные значения давления, получим

$$p_E^{2+n} = \tilde{p}_E^{2+n} + \phi, \quad (4)$$

где

$$\phi = \frac{(2^{2+n} - 1)\Lambda}{2^{2+n} a} e^{-a(L-l)} (e^{aL/2} - 1).$$

Так как при произвольном уклоне $\sin \alpha$ поправка ϕ имеет положительное значение, то прокладка лупинга способствует увеличению значения p_E давления в конце участка и меньшей трате энергии на транспортировку газа. Увеличение значения l , согласно оценке

$$\frac{\partial p_E}{\partial l} \sim e^{-a(L-l)} (e^{aL/2} - 1),$$

приводит к увеличению значения p_E для трассы с подъемом и уменьшению его значения – для трассы со спуском. Но во втором случае значение p_E ограничено снизу $\tilde{p}_E$. Таким образом, с точки зрения экономии энергии на компримирование газа при положительном уклоне трассы целесообразно установить лупинг в начале участка, а при отрицательном уклоне – в конце.

Для горизонтального газопровода ($a \rightarrow 0$) значение давления в точке E не зависит от местоположения точки B и составляет для наличия лупинга:

$$p_E^{2+n} = p_A^{2+n} - \Lambda L \frac{2^{3+n} - 2^{2+n} + 1}{2^{3+n}},$$

а при отсутствии лупинга:

$$\tilde{p}_E^{2+n} = p_A^{2+n} - \Lambda L.$$

Соответствующие развитому турбулентному режиму течения формулы ($n = 0$; $\varsigma = 0,11$; $\theta = 0,25$)

$$p_E^2 = p_A^2 - 5\Lambda L / 8 \text{ и } \tilde{p}_E^2 = p_A^2 - \Lambda L.$$

Из формулы (4) при известных значениях давления p_A и p_E в концах участка можно определить пропускную способность рассматриваемого участка [7]

$$\tilde{M} = \left(\frac{2DF^2}{(2+n)\xi ZRT} \frac{\tilde{p}_E^{2+n} - p_A^{2+n} e^{-aL}}{e^{-aL} - 1} \right)^{1/(2+n)}. \quad (5)$$

Положительное значение второго множителя в скобке соответствует осуществимым режимам функционирования элементарного участка. Аналогичную (5) формулу можно получить и из выражения (4) для случая наличия лупинга. Сравнение этих двух формул приводит к зависимости

$$\psi = \left(\frac{M}{\tilde{M}} \right)^{2+n} = \frac{1}{1 + \frac{2^{2+n} - 1}{2^{2+n}} e^{-a(L-l)} \frac{e^{aL/2} - 1}{e^{-aL} - 1}}.$$

При $a > 0$ имеет место условие $\psi > 1$, т.е. для трубы с подъемом прокладка лупинга приводит к увеличению пропускной способности участка.

Аналогичная картина наблюдается для горизонтальной трубы, т.е. при $(a \rightarrow 0)$. Раскрытие ψ по правилу Лопиталья показывает, что при проводке лупинга пропускная способность участка увеличивается в $\left(\frac{2^{3+n}}{2^{3+n} - 2^{2+n} + 1} \right)^{1/(2+n)}$ раз. В развитом турбулентном режиме течения этот показатель равняется $\sqrt{8/5}$.

Анализом установлено, что прокладка лупинга в участок с отрицательным уклоном ($\sin \alpha < 0$) также приводит к увеличению пропускной способности участка ($\psi < 1$).

Чтобы определить целесообразное расположение лупинга, необходимо оценить $\frac{\partial M}{\partial l}$. Учитывая $\frac{\partial M}{\partial l} \sim \frac{\partial \psi}{\partial l}$, имеем оценку $\frac{\partial M}{\partial l} \sim a$.

Для трассы с подъемом наибольшая пропускная способность достигается при прокладке лупинга в конце участка, а для трассы со спуском – в начале участка. Для горизонтальной трубы месторасположение лупинга в рамках задачи не влияет на пропускную способность участка.

Таким образом, прокладка лупинга приводит к увеличению пропускной способности участка для горизонтальной трассы и для случая подъема трассы, а в случае с отрицательным уклоном он дает обратный эффект, что не согласуется с мнением [2] для горизонтальной трубы.

Однозначное преимущество прокладки лупинга проявляется при оценке аккумулирующей способности участка, которая полезна при сглаживании суточной неравномерности добычи и потребления газа.

Согласно постановке задачи при наличии лупинга, аккумулирующая способность элементарного участка с $\sin \alpha \geq 0$ увеличивается в полтора и более раз, чему способствуют увеличения физического объема участка и среднего по участку значения давления. Такая же оценка имеет место для горизонтального газопровода. Выяснено, что для получения максимальной аккумулирующей способности местоположение лупинга надо определять в конце с наибольшим давлением, т.е. на участках, где имеет место режим после «перевальной точки» ($dp/dx > 0$), лупинг следует установить в конце участка, а в остальных случаях – в начале его.

Заключение

Таким образом:

– удалось обобщить задачу об оптимальной проводке лупинга для рельефного газопровода и для всех пяти режимов течения;

- определить характер изменения давления, пропускной и аккумулирующей способностей участка с лупингом;
- выделить целесообразные варианты прокладки лупинга, которые не всегда согласуются со случаем горизонтальной трассы.

Список литературы

1. Чугаев Р. Р. Гидравлика. М. : Энергия, 1970. 672 с.
2. Штыков Р. А. Путевое изменение коэффициента сверхсжимаемости газа на однопоточных и многопоточных участках магистрального газопровода // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 145–148.
3. Штыков Р.А. Разработка численного алгоритма определения гидравлических параметров двух групп параллельных нитей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 1. С. 270–273.
4. Юрков Н. К., Штыков Р. А. Единое компонентное уравнение для сложносоставного горючего газа // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 1. С. 163–165.
5. Штыков Р. А. Процесс изменения коэффициента сверхсжимаемости газа на участках газопровода // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1. С. 56–63.
6. Юрков Н. К., Штыков Р. А. Оптимизация управления транспортировкой газа по трубопроводам путем анализа динамики изменения концентрации примесей // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 87–92.
7. Штыков Р. А. Процесс образования круглой турбулентной струи природного и сжиженного газов в диффузионном факеле // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 4. С. 85–89.

References

1. Chugaev R.R. *Gidravlika = Hydraulics*. Moscow: Energiya, 1970:672. (In Russ.)
2. Shtykov R.A. Path change of the gas superconductivity coefficient on single- and multi-threaded sections of the main gas pipeline. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:145–148. (In Russ.)
3. Shtykov R.A. Development of a numerical algorithm for determining the hydraulic parameters of two groups of parallel threads. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;1:270–273. (In Russ.)
4. Yurkov N.K., Shtykov R.A. A single component equation for a compound combustible gas. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;1:163–165. (In Russ.)
5. Shtykov R.A. The process of changing the gas superconductivity coefficient in gas pipeline sections. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(1):56–63. (In Russ.)
6. Yurkov N.K., Shtykov R.A. Optimization of gas transportation control through pipelines by analyzing the dynamics of changes in the concentration of impurities. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):87–92. (In Russ.)
7. Shtykov R.A. The process of formation of a round turbulent jet of natural and liquefied gases in a diffusion flare. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(4):85–89. (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. Карла Маркса 11)
E-mail: ipmrroman@yandex.ru

Антон Владимирович Алексеев

кандидат технических наук,
доцент кафедры механики и инженерной графики,
Приволжский государственный
университет путей сообщения
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2В)
E-mail: antonvladim@mail.ru

Roman A. Shtykov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of physics and applied mathematics,
Murom Institute of Vladimir State University
(11 Karl Marks street, Murom, Russia)

Anton V. Alekseev

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of mechanics and engineering graphics,
Volga Region State Transport University
(2V Svobody street, Samara, 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,
honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the 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 18.09.2024

Поступила после рецензирования/Revised 14.10.2024

Принята к публикации/Accepted 28.10.2024