МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.867.72 EDN: FRDXTF

[1]Бабанин А. Я., [2,]*Кикош Т. А., [1]Спажук В. В.
[1]Южное отделение ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина»,
[2]Донецкий национальный технический университет
**E-mail: kikoshtaras@mail.ru*

ОПТИМАЛЬНЫЙ РАДИУС ПОВОРОТА ТРУБОПРОВОДА ШЛАМОВОЙ МАГИСТРАЛИ С УСЛОВНЫМ ПРОХОДНЫМ СЕЧЕНИЕМ 150 ММ

В статье рассматривается вопрос оптимизации конструкции шламовой транспортной системы (ШТС), в частности её составной части — шламовой магистрали, конструкционные особенности которой определяют производительность всей ШТС и затраты на её эксплуатацию. К особенностям конструкции шламовой магистрали следует отнести её значительную длину и сложную траекторию в связи с особенностями местного рельефа, включающую повороты трубопровода на определенный угол как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости.

В работе выполнен анализ нормативных требований, гидродинамики потока и факторов износа, на основании чего обоснован выбор минимального радиуса поворота, обеспечивающего баланс между технической надежностью и экономической эффективностью. На основе анализа действующих нормативных документов установлено минимальное значение радиуса (не менее 5DN). С использованием эмпирических зависимостей выполнен численный расчет гидравлических потерь в отводах с различными радиусами кривизны. Показано, что увеличение радиуса поворота до (10–15)DN позволяет снизить коэффициент местного сопротивления и существенно уменьшить интенсивность гидроабразивного износа внутренней стенки отвода.

Ключевые слова: *шламовая магистраль, радиус поворота, гидравлические потери, критическая скорость потока, гидроабразивный износ, металлургическое предприятие.*

Введение. В настоящее время на металлургических и горно-обогатительных предприятиях для перемещения образующихся шламов на значительные расстояния (от шламоприемника до шламотстойника) широко применяются шламовые трубопроводные системы (ШТС). Такие системы включают в себя насосные станции, оборудованные насосами соответствующей мощности, а также запорную арматуру. Шламовая магистраль состоит из трубопровода соответствующего диаметра, зачастую имеющего значительную протяженность (10 и более километров), а также сложную траекторию в связи с особенностями местного рельефа. Поэтому транспортируемая в трубопроводе шламовая смесь в процессе движения меняет направление как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости в соответствии с углом поворота трубопровода. Изменение направления движения шламовой смеси существенно влияет на структуру потока, которая определяет гидродинамические параметры и снижает производительность транспортной системы.

Кроме того, структура потока и его скорость движения в значительной мере влияют на абразивный износ трубопровода и запорной арматуры. Исследования оптимального радиуса поворота трубопровода шламовой магистрали с условным проходным сечением 150 мм являются актуальной задачей для оптимизации работы существующих ШТС и проектирования новых. В настоящей работе выполнены гидравлические расчеты коэффициента местного сопротивления отвода 90º для трубопровода условным диаметром 150 мм и на их основе предложены рекомендации по выбору оптимального радиуса изгиба, обеспечивающего баланс между скоростью потока (гидравлической эффективностью) и ресурсом работы шламовой магистрали.

Гидродинамика потока и расчет местных гидравлических потерь. При движении потока шламовой смеси в пря-

мом трубопроводе основную роль играют потери на трение по длине. Однако в местах изменения направления движения возникают гидравлические сопротивления, обусловленные действием центробежных сил [1]. Коэффициент местного сопротивления ζ, который показывает, во сколько раз потери давления (напора) больше динамического давления потока, для труб круглого сечения с плавным поворотом на угол 90º при переходном режиме движения жидкости может быть определен по эмпирической формуле, приведенной в справочной литературе [2]:

$$\zeta = 0{,}02 \cdot (100\lambda)^{2{,}5} + 0{,}106 \cdot (d/R)^{2{,}5}, \quad (1)$$

где d — внутренний диаметр трубопровода, м; R — радиус поворота отвода, м; $\lambda = 0{,}028$ — гидравлический коэффициент трения [2].

Гидравлический расчет для внутреннего диаметра трубопровода DN = 150 мм. Выполним расчет потерь давления на местном сопротивлении для отвода с углом поворота 90º при следующих исходных данных: условный проход DN = 150 мм, наружный диаметр по ГОСТ 10704-91 [3] принимаем 159 мм при толщине стенки $s = 4{,}5$ мм. Тогда внутренний диаметр $d_{вн} = 159 – 2 \cdot 4{,}5 = 150$ мм $\approx 0{,}15$ м.

Принимаем скорость движения гидросмеси $v = 1$ м/с (минимальная рекомендуемая скорость для шламовых смесей); плотность гидросмеси $\rho_{см} = 1400$ кг/м^3.

Рассмотрим четыре варианта радиуса поворота отвода R [4, 5]:

1. $R_1 = 2{,}5 \cdot DN = 375$ мм $\approx 0{,}375$ м.

2. $R_2 = 5 \cdot DN = 750$ мм $\approx 0{,}75$ м (минимально допустимый).

3. $R_3 = 10 \cdot DN = 1500$ мм $\approx 1{,}5$ м (рекомендуемый промежуточный).

4. $R_4 = 15 \cdot DN = 2250$ мм $\approx 2{,}25$ м (наибольший из рекомендуемых).

Коэффициенты местного сопротивления:

$$\zeta_1 = 0{,}02 \cdot (100 \cdot 0{,}028)^{2{,}5} + 0{,}106 \cdot (0{,}15/0{,}375)^{2{,}5} = 0{,}273,$$

$$\zeta_2 = 0{,}02 \cdot (100 \cdot 0{,}028)^{2{,}5} + 0{,}106 \cdot (0{,}15/0{,}750)^{2{,}5} = 0{,}264,$$

$$\zeta_3 = 0{,}02 \cdot (100 \cdot 0{,}028)^{2{,}5} + 0{,}106 \cdot (0{,}15/1{,}5)^{2{,}5} = 0{,}262,$$

$$\zeta_4 = 0{,}02 \cdot (100 \cdot 0{,}028)^{2{,}5} + 0{,}106 \cdot (0{,}15/2{,}25)^{2{,}5} = 0{,}262.$$

Можно заметить, что коэффициенты местного сопротивления после увеличения радиуса поворота свыше 5DN уменьшаются незначительно.

Потери напора на местном сопротивлении определяем по формуле Дарси — Вейсбаха [2]:

$$\Delta p = \zeta \cdot (\rho_{см} \cdot v^2)/2. \quad (2)$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Абсолютное снижение потерь при переходе от минимально допустимого радиуса ($R = 750$ мм) к оптимальному ($R = 2250$ мм) составляет всего около 1,4 Па (менее 0,8 %). Однако это ни в коем случае не означает незначимость увеличения радиуса: при $R/d \geq 5$ формула дает очень близкие значения ζ. Ключевое преимущество увеличения радиуса поворота кроется не в снижении гидравлического сопротивления (которое при $R/d \geq 5$ уже близко к минимальному), а в существенном уменьшении гидроабразивного износа наружной стенки отвода за счет плавного изменения направления движения твердых частиц.

Таблица 1

Результаты гидравлического расчета отвода 90º (DN = 150)

Радиус R, мм	Отношение радиуса поворота трубопровода к внутреннему диаметру трубопровода, R/d	Коэффициент местного сопротивления, ζ	Потери напора Δp, Па
375	2,5	0,273	191,1
750	5	0,264	184,8
1500	10	0,262	183,6
2250	15	0,262	183,4

Влияние радиуса поворота на абразивный износ. Применительно к шламовым магистралям помимо гидравлической эффективности ключевое значение имеет проблема гидроабразивного износа. Движущиеся в потоке твердые частицы с высокой скоростью ударяются о стенки трубопровода, вызывая их постепенное истирание. Интенсивность износа зависит от концентрации, формы, твердости частиц, а также от характера их взаимодействия со стенкой.

На поворотных участках траектория движения частиц изменяет направление, и они под действием центробежной силы концентрируются у внешней стенки поворота. При малом радиусе изгиба ($R/d < 5$) траектория резко меняет направление, что увеличивает количество «косых ударов» о стенку и ускоряет эрозионное разрушение. Увеличение радиуса поворота способствует плавному изменению траектории частиц, снижая концентрацию напряжений и уменьшая темпы износа.

Для изучения гидродинамической структуры потоков и исследования зон, подверженных наибольшему абразивному износу, проведено моделирование потока (рис. 1–4).

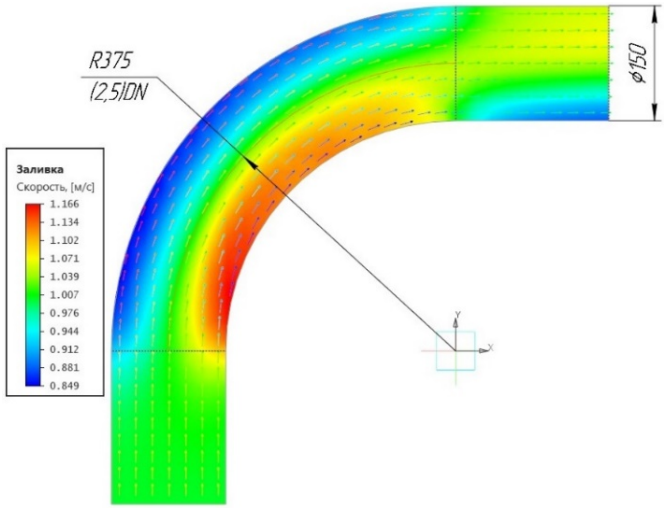


Рисунок 1 — Гидродинамическая структура потока шламовой смеси DN = 150 мм, R = 375 мм

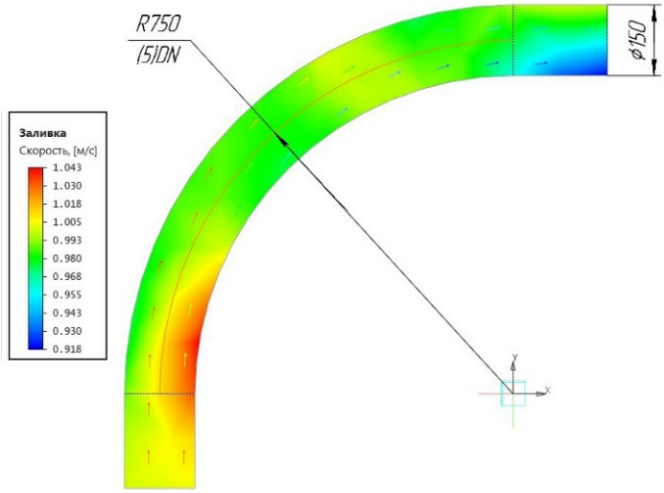


Рисунок 2 — Гидродинамическая структура потока шламовой смеси DN = 150 мм, R = 750 мм

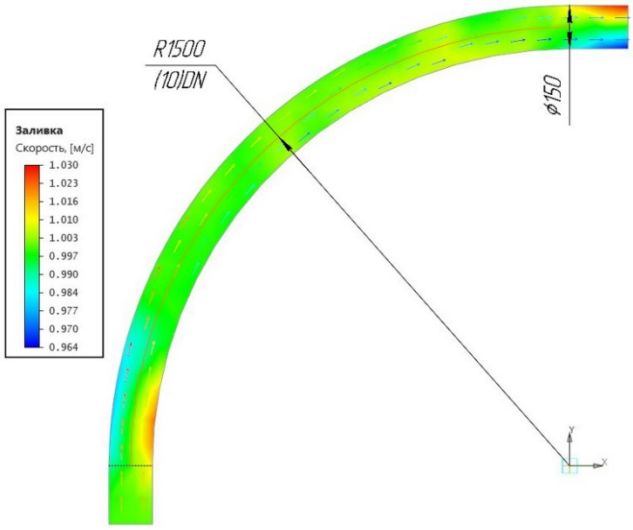


Рисунок 3 — Гидродинамическая структура потока шламовой смеси DN = 150 мм, R = 1500 мм

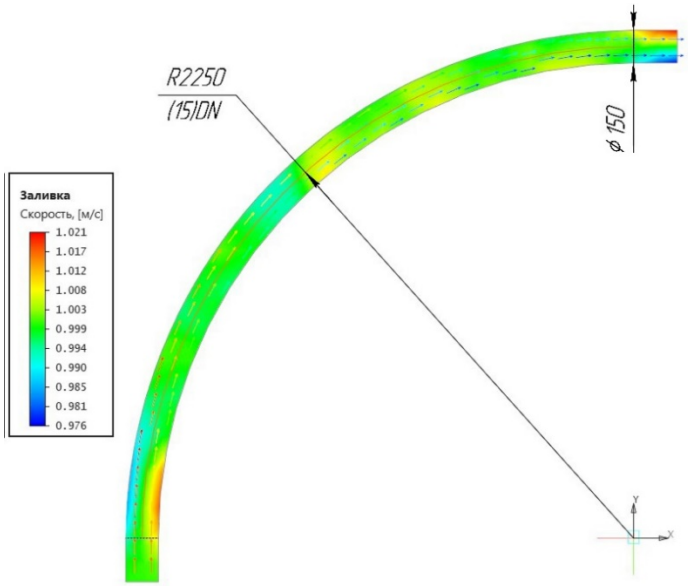


Рисунок 4 — Гидродинамическая структура потока шламовой смеси DN = 150 мм, R = 2250 мм

На рисунке 1 видно, что минимальный радиус 2,5DN приводит к более резкой перестройке потока. Разность скоростей возле внутренней и наружной стенок трубопровода достигает величины 0,317 м/с. Такая неравномерность ускоряет гидроабразивный износ и увеличивает гидравлические потери. Увеличение радиуса до 5DN (рис. 2) заметно выравнивает поле скоростей, разность сокращается примерно до 0,125 м/с. Радиусы 10DN (рис. 3) и 15DN (рис. 4) обеспечивают близкое к оптимальному распределение скоростей. При 10DN разность составляет около 0,066 м/с, а при 15DN — не более 0,045 м/с. Профиль скорости приближается к симметричному, характерному для прямого участка трубопровода. Данные исследования гидродинамической структуры потока сведены в таблицу 2.

По нормативным документам (ГОСТ Р 55990-2014 и СП 284.1325800.2016) минимальный радиус изгиба трубопровода должен составлять не менее 5DN [4, 6].

Таблица 2

Данные исследования гидродинамической структуры потока

Радиус *R*, мм	Отношение радиуса поворота трубопровода к внутреннему диаметру трубопровода *R/d*	Средняя скорость потока, м/с	Минимальная скорость потока, м/с	Максимальная скорость потока, м/с	Разность скоростей потока Δ, м/с
375	2,5	1	0,849	1,166	0,317
750	5		0,918	1,043	0,125
1500	10		0,964	1,030	0,066
2250	15		0,976	1,021	0,045

Сравнительный анализ показывает, что оптимальное значение радиуса для шламовой магистрали находится в диапазоне 10–15DN. Для рассматриваемого диаметра это: $R_{opt} \approx 1500$ мм или 2250 мм. При таком радиусе минимизируются гидравлические потери и интенсивность износа, что дает максимальный ресурс трубопровода при разумных капитальных затратах.

Заключение. Установлено, что применительно к работе шламовых транспортных систем в условиях металлургических предприятий для шламовой магистрали с условным проходом 150 мм оптимальный радиус поворота трубопровода составляет 1500–2250 мм (10–15 внутреннего диаметра трубопровода).

Это позволяет:

– обеспечить минимальный коэффициент местного сопротивления и наименьшие гидравлические потери;

– снизить гидроабразивный износ наружной стенки поворотного участка и тем самым продлить ресурс трубопровода;

– избежать аварийных простоев производства, связанных с повреждением отводов.

Можно выделить, что гидродинамическая структура потока шламовой смеси со средней скоростью потока 1 м/с не будет претерпевать серьезных отличий при изменении проходного сечения трубопровода, как в большую, так и в меньшую сторону.

При проектировании новых и реконструкции действующих шламовых магистралей целесообразно учитывать результаты данных исследований для выработки оптимальной геометрии трассы с целью обеспечения высокой надежности и производительности всей шламовой транспортной системы.

Список источников

1. Мозговой А. Ю. Сборник задач по гидравлике : учеб. пособие. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. 92 с.

2. Справочник по гидравлике / В. А. Большаков [и др.] ; под ред. В. А. Большакова. 2-е изд., перераб. и доп. К. : Высшая школа, 1984. 343 с.

3. ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент. М. : Изд-во стандартов, 1991. 8 с.

4. ГОСТ Р 55990-2014. Месторождения нефтяные и газонефтяные. Промысловые трубопроводы. Нормы проектирования. М. : Стандартинформ, 2014. 120 с.

5. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы : актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85. М. : Стандартинформ, 2013. 102 с.*

6. СП 284.1325800.2016. Трубопроводы промысловые для нефти и газа. М. : Стандартинформ, 2017. 84 с.

© Бабанин А. Я., Спажук В. В., 2026
© Кикош Т. А., 2026

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П., к.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТУ Денисовой Н. А.

Статья поступила в редакцию 15.09.2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабанин Анатолий Яковлевич, *д-р. техн. наук, директор научного центра черной металлургии Южное отделение ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина» г. Донецк, Россия*

Кикош Тарас Андреевич, *аспирант каф. механического оборудования заводов черной металлургии Донецкий национальный технический университет г. Донецк, Россия, e-mail: kikoshtaras@mail.ru*

Спажук Валерий Витальевич, *директор Южное отделение ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина» г. Донецк, Россия*

Babanin A. Ya. *(South Branch of the SSC FSUE "TSNIIchermet named after I. P. Bardin", Donetsk, Russia)***, Kikosh T. A.** *(Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia, e-mail: kikoshtaras@mail.ru)***, Spazhuk V. V.** *(South Branch of the SSC FSUE "TSNIIchermet named after I. P. Bardin", Donetsk, Russia)*

OPTIMAL RADIUS OF TURNING THE SLURRY TRUNK PIPELINE WITH A NOMINAL FLOW SECTION OF 150 MM

The article addresses the optimization of the design of a slurry transport system (STS), specifically its component — the slurry trunk, the design features of which determine the performance of the entire STS and its operating costs. The design feature of the slurry trunk is characterized by its significant length and complex routing due to local topography, which includes pipeline bends at specific angles in both the horizontal and vertical planes.

This study analyzes regulatory requirements, flow hydrodynamics and wear factors, on the basis of which the choice of the minimum turning radius that ensures a balance between technical reliability and economic efficiency is justified. Based on an analysis of current regulatory documents, a minimum radius value (at least 5DN) has been determined. Using the empirical correlations, a numerical calculation of hydraulic losses in bends with various radii of curvature was performed. It is shown that increasing the bend radius to (10–15) DN allows to reduce the local resistance coefficient and significantly decrease the intensity of hydro-abrasive wear on the inner wall of the bend.

Key words: *slurry trunk, radius of turning, hydraulic losses, critical flow velocity, hydroabrasive wear, iron and steel works.*

References

1. Mozgovoy A. Yu. Collection of problems in hydraulics : a study guide [Sbornik zadach po gidravlike : ucheb. posobie]. Krasnoyarsk : SibFU. 2012. 92 p.

2. Bol'shakov V. A. [et al.]. Hydraulics handbook [Spravochnik po gidravlike]. Eds. Bol'shakov V. A. 2nd ed. repr. and add. K : Vysshaya shkola. 1984. 343 p.

2. GOST 10704-91. Electrically welded steel line-weld tubes. Range [GOST 10704-91. Truby stal'nye elektrosvarnye pryamoshovnye. Sortament]. M. : Izd-vo standartov. 1991.8 p.

3. GOST P 55990-2014. Oil and gas-oil fields. Field pipelines. Design codes [GOST R 55990-2014. Mestorozhdeniya neftyanye i gazoneftyanye. Promyslovye truboprovody. Normy proektirovaniya]. M. : Standartinform. 2014. 120 p.

4. SP 36.13330.2012. Pipelines: updated version of SNiP 2.05.06-85 [SP 36.13330.2012. Magistral'nye truboprovody : aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.05.06-85*]. M. : Standartinform. 2013. 102 p.*

5. SP 284.1325800.2016. Field pipelines for oil and gas [SP 284.1325800.2016. Truboprovody promyslovye dlya nefti i gaza]. M. : Standartinform. 2017. 84 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

***Babanin Anatoly Yakovlevich*,** *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Ferrous Metallurgy Research Centre*
South Branch of the SSC FSUE "TSNIIchermet named after I. P. Bardin",
Donetsk, Russia

***Kikosh Taras Andreevich,** Postgraduate student of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants*
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Russia, e-mail: kikoshtaras@mail.ru

***Spazhuk Valery Vitalievich,** Director*
South Branch of the SSC FSUE "TSNIIchermet named after I. P. Bardin",
Donetsk, Russia