Оценка энергопотребления насосов при изменении толщины слоя отложений в водопроводных трубах

Балашов Сергей Сергеевич
аспирант, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 9, 6761034@gmail.com

В статье рассмотрено влияние толщины слоя внутренних отложений в металлических трубах на изменение характеристик гидравлического потенциала и энергопотребление насосного оборудования в сетях водоснабжения. Тема статьи связана с расширенным использованием в разных регионах страны стальных и чугунных труб в действующих сетях водоснабжения и снижением их гидравлической эффективности в процессе эксплуатации из-за зарастания внутренней поверхности трубопроводов [1, 7, 11].
Методическая основа статьи соответствует подходу, изложенному в публикациях О.А. Продоуса и его соавторов, где гидравлический расчет металлических трубопроводов с внутренними отложениями рассматривается как необходимый элемент для оценки эксплуатационного состояния изношенных водопроводных сетей [2–4].
Цель работы состоит в установлении количественной зависимости между толщиной слоя внутренних отложений, фактическим внутренним диаметром труб, гидравлического и фактической величине энергопотребления насосного оборудования. Установлено, что уменьшение диаметра труб с отложениями приводит к изменению скорости движения потока, фактического гидравлического уклона и величине энергопотребления насоса.
Ключевые слова: металлические трубы, эксплуатация, внутренние отложения, энергопотребление.

В Российской Федерации и странах постсоветского пространства значительная часть водопроводных сетей выполнена из стали и серого чугуна. Это является причиной внутреннего зарастания труб, что ухудшает их гидравлические характеристики в течение длительного периода эксплуатации [1]. На внутренней поверхности металлических труб образуется слой отложений различной природы происхождения, вследствие чего уменьшается их фактический внутренний диаметр, возрастает сопротивление движению потока и увеличиваются потери напора по длине при транспортировании воды [2, 3]. Изменения величины значений гидравлических характеристик труб приводят к снижению пропускной способности трубопровода и к возрастанию энергозатрат насосного оборудования, что особенно важно для протяженных водоводов и энергетически нагруженных участков сети [4].
В работах О.А. Продоуса, П.П. Якубчика, Д.И. Шлычкова и других авторов доказано, что утвержденная в СП31.13330-2021 методика традиционного гидравлического расчета новых труб не позволяет объективно оценивать фактические гидравлические потери при эксплуатации изношенных сетей, так как не учитывает изменение величины фактического внутреннего диаметра труб и гидравлических сопротивлений при наличии слоя внутренних отложений [2–5, 12]. Предлагается новый подход, основанный на использовании уточненных зависимостей для гидравлического расчета металлических труб с отложениями с учетом оценки эффективности эксплуатации металлических трубопроводов по коэффициенту эффективности их эксплуатации $K_{эф}$ [6].

Практическая значимость данной статьи состоит в гидравлическом обосновании продолжительности остаточной эксплуатации изношенных сетей, назначении сроков гидродинамической очистки, замены отдельных участков сети на новые, либо замены насосного оборудования.

Материалы и методы

Методической основой для гидравлического расчета труб выступают уточненные зависимости для гидравлического расчета металлических труб с внутренними отложениями, опубликованные в работах [3, 5, 8]. Расчеты выполнялись с использованием разработанной авторами компьютерной программы для ЭВМ «ГРИТ».

Для гидравлического расчета металлических труб с внутренними отложениями использованы следующие расчетные зависимости:

$$d_{вн}^{р} = d_{н} - 2S_{р}, \quad \text{мм}, \tag{1}$$

где:

$d_{вн}^{р}$ – расчетный внутренний диаметр трубы по ГОСТ;

$d_{н}$ – наружный диаметр трубы по ГОСТ, м;

$S_{р}$ – толщина стенки трубы по ГОСТ, м.

$$d_{вн}^{ф} = d_{н} - 2S_{р} - 2\delta_{ф}, \quad \text{мм} \tag{2}$$

где:

$\delta_{ф}$ – фактическая (измеренная прибором) толщина слоя внутренних отложений, м.

$$V_{ф} = \frac{4q}{\pi\left(d_{вн}^{ф}\right)^{2}}, \quad \text{м/с}, \tag{3}$$

где:

$V_{ф}$ – фактическая скорость движения воды в трубах со слоем отложений $\delta_{ф}$, м/с.

q – заданный расход, л/с ($м^{3}/с$);

$$i_{ф} = 0{,}00107\frac{V_{ф}^{2}}{\left[\left(d_{н} - 2S_{р}\right) - 2\delta_{ф}\right]^{1{,}3}}, \quad \text{мм/м}, \tag{4}$$

где:

$i_{ф}$ – фактический гидравлический уклон или потери напора на сопротивление по длине труб, мм/м;

$V_{ф}$ – фактическая скорость воды в трубах со слоем отложений $\delta_{ф}$, м/с.

Энергопотребление нового и изношенного водопровода, определяется по формуле (5):

$$N_{дв}^{р(ф)} = 10^{6}\cdot i_{р(ф)}\cdot\left(d_{вн}^{р(ф)}\right)^{2}\cdot V_{р(ф)}\cdot\frac{0{,}00808}{\eta}, \text{кВт/ч}, \tag{5}$$

где:

$N_{дв}^{р(ф)}$ – энергопотребление насосного агрегата, установленного в новом и изношенном трубопроводе, кВт/ч;

η – КПД насосного оборудования. Для расчетов принимают $\eta = 0{,}7$.

Рассмотрим практический пример.

По стальному водопроводу из электросварных труб, диаметром $d_н = 325$ *мм*, транспортируется вода с расходом $q =$ 80 л/с. Толщина стенки новой трубы $S_p =$ 8 мм. Водопроводная сеть эксплуатируется более 10 лет.

Рассчитать значение характеристик гидравлического потенциала сети при изменении значений $d_{вн}^{ф}$ за счёт образования слоя внутренних отложений в диапазоне $\delta_ф = 1 \div 10{,}0$ *мм*.

Показать графически изменения в значении функций:

$$d_{вн}^{ф} = f(\delta_ф), \quad V_{вн}^{ф} = f(\delta_ф), \quad i_ф = f(\delta_ф)$$

Построить для сравнения графики зависимости $N_{дв}^{р(ф)} = f(\delta_ф)$ и показать изменения характеристик гидравлического потенциала труб и энергопотребление насоса $N_{дв}^{р(ф)}$ для новых и изношенных водопроводных труб ($\delta_ф = 1 \div 10{,}0$ *мм*). Использовать для расчёта новых труб следующий диапазон изменения скоростей движения воды:

$V_р = 0\,;0{,}5\,;1{,}0\,;1{,}5\,;2{,}0$ *м / с*

Методика гидравлического расчёта значений характеристик гидравлического потенциала металлических изношенных стальных водопроводных труб с разным слоем внутренних отложений подробно описано в работах [1, 9].

Методика предусматривает расчёт значения величины безразмерного коэффициента эффективности эксплуатации сети $K_{эф}$, зависящего от толщины фактического слоя отложений $\delta_ф$. Его значение определяют по формуле:

$$K_{эф} = \frac{N_{дв}^{р}}{N_{дв}^{ф}}; \quad (6)$$

где:

$N_{дв}^{р(ф)}$ – энергопотребление насосного агрегата, установленного в новом и изношенном трубопроводе, кВт/ч;

Значение характеристик гидравлического потенциала $d_{вн}^{ф}, V_ф, i_ф$ и величины энергопотребления насоса для разных значений толщины слоя отложений в трубах $\delta_ф$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение значений характеристик гидравлического потенциала труб диаметром $d_н = 0{,}325$ *мм.*

q, л/с	$\delta_ф$, *мм*	$d_{вн}^{ф}$, *мм*	$V_ф$, м/с	$i_ф$, мм/м.	$N_{дв}^{ф}$, кВт/ч
80	0	309	1,07	5,605	6,60
80	2	305	1,10	6,006	7,07
80	4	301	1,12	6,441	7,58
80	6	297	1,15	6,915	8,14
80	8	293	1,19	7,430	8,75
80	10	289	1,22	7,991	9,41

На рис. 2, 3, 4 по данным табл. l показаны графические изменения указанных характеристик труб при изменении значений $\delta_ф$в диапазоне от 0 до 10 мм включительно.

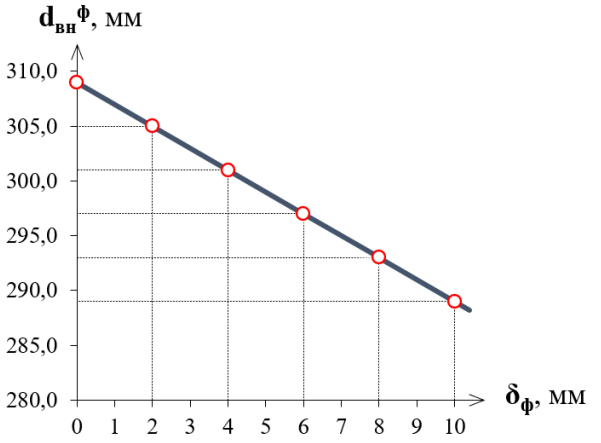


Рис. 2 График зависимости $d_{вн}^{ф} = f(\delta_ф)$

Изменение $V_{вн}^{ф}$ для условий данной задачи показано на рис. 3.

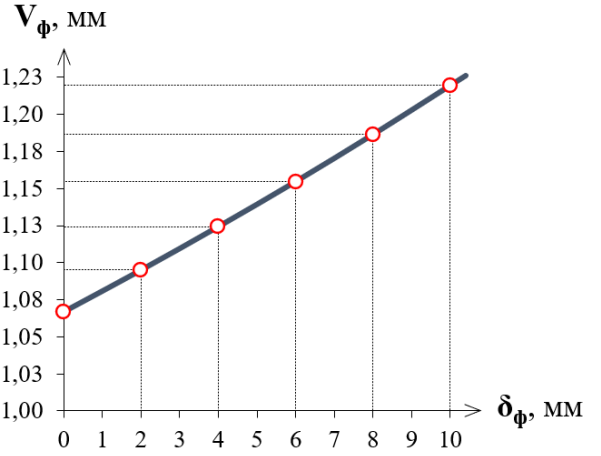


Рис. 3 График зависимости $V_ф = f(\delta_ф)$

Изменение значений $i_ф$ показано на рис. 4.

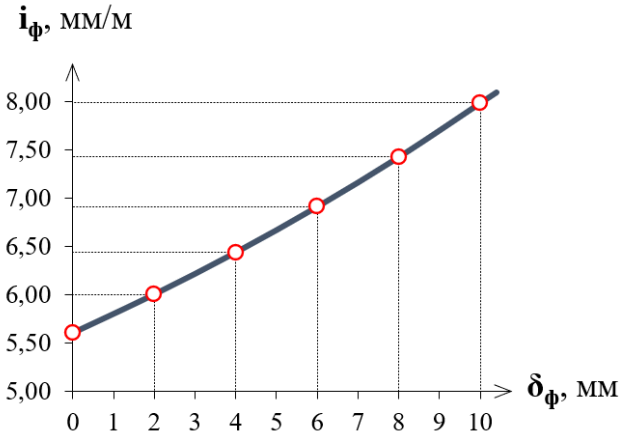


Рис. 4 График зависимости $i_ф = f(\delta_ф)$

Зависимость энергопотребления насосного агрегата $N_{дв}^{ф}$ в зависимости от толщины стоя отложений в трубах представлена на рис. 5.

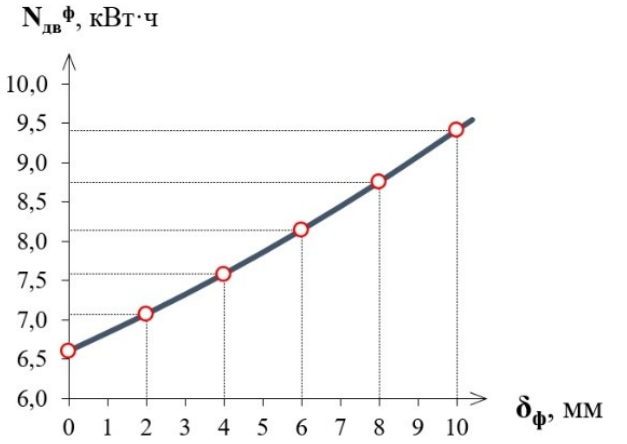


Рис.5 График зависимости $N_{дв}^{р(ф)} = f(\delta_ф)$

Процент расхождения значений энергопотребления насоса $N_{дв}^{ф}$, вычислялся с помощью программы для ЭВМ «ГРИТ» [5].

Отмечено на практике, что чем больше по величине напор, создаваемый насосом $H_{р(ф)}$, тем больше его энергопотребление $N_{дв}^{р(ф)}$ и наоборот. Поэтому, при подборе насосного оборудования для транспортирования заданного расхода питьевой воды q по сетям из стали и серого чугуна всегда следует учитывать, что металлические водопроводные сети в процессе эксплуатации изменяют свой фактически внутренний диаметр труб $d_{вн}^{ф}$ [14].

Анализ полученных результатов в табл.1 гидравлического расчета труб для условий данной задачи показывает, что даже небольшое уменьшение фактического внутреннего диаметра труб $d_{вн}^{ф}$ вызывает изменение величины

фактического гидравлического уклона $i_ф$ и росту энергопотребления насоса $N_{дв}^{ф}$ на 42,6% [11, 13]. Увеличение толщины слоя отложений в трубах $\delta_ф$ приводит к возрастанию энергопотребления насоса $N_{дв}^{ф}$ и подтверждает необходимость проведения механической или гидродинамической очистки сетей от слоя внутренних отложений [2, 4].

Прогнозирование изменения величины энергопотребления насоса $N_{дв}^{ф}$ на основе анализа изменений толщины слоя отложений в трубах $\delta_ф$ является способом обоснования необходимости повышения эффективности эксплуатации изношенных водопроводных сетей с внутренними отложениями, и обеспечивает обоснованный вывод из эксплуатации для проведения их восстановительных работ или замены труб на новые из полимерных материалов.

Зависимости (1-6) являются базовыми для проведения оценки фактического гидравлического состояния изношенных водопроводных труб с внутренними отложениями на основе расчета коэффициента эффективности эксплуатации водопроводных сетей $K_{эф}$, по величине которого определяется продолжительность периода их остаточной эксплуатации [4, 6, 10].

Литература

1. Продоус О.А., Якубчик П.П., Шлычков Д.И. Особенности гидравлического расчета водопроводов из металлических, полимерных и металлополимерных труб // Терминологический словарь... – М.: Издательство Перо. 2023. – С. – 288.
2. Продоус О.А., Якубчик П.П. и др. Рекомендации по оценке эффективности эксплуатации изношенных водопроводных и канализационных сетей с внутренними отложениями. – СПб. –М.: Издательство Перо, 2025. С. – 58
3. Шевелёв Ф.А., Шевелёв А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. – М.: Бастет, 2016. С. – 382.
4. Продоус О.А., Шипилов А.А. и др. Гидравлический критерий обоснования необходимости разработки проектов реконструкции водопроводных сетей из металлических труб // Водные системы и технологии. Вестник МГСУ. 2020. № 1. С. – 26 – 31.
5. Продоус О.А., Якубчик П.П., Балашов С.С. Совершенствование гидравлического расчета металлических водопроводов с использованием программного обеспечения «ГРИТ» // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2026. Т. 23. № 1. С. – 139 – 145.
6. Продоус О.А., Шлычков Д.И., Якубчик П.П. Пархоменко С.В Влияние толщины слоя внутренних отложений в трубопроводах систем водоснабжения и водоотведения на продолжительность периода их остаточной эксплуатации // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 6. С. – 738 – 746.
7. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Систематизация гидравлического расчета металлических сетей водоснабжения и водоотведения с внутренними отложениями на стенках труб // Строительство: наука и образование. НИУ МГСУ. 2022. Т. 12. №3. ст. 7. Москва. С. – 115 – 124.
8. Продоус О.А., Якубчик П.П., Балашов С.С. О повышении точности гидравлического расчета металлических водопроводов с внутренними отложениями // В сборнике: Технологии очистки воды "ТЕХНОВОД-2023". Материалы XIV Международной научно-практической конференции. Новочеркасск, 2023. С. – 80 – 85.
9. Продоус О.А., Якубчик П.П., Балашов С.С. О влиянии толщины слоя внутренних отложений в металлических водопроводах на величину фактических потерь напора в трубах // В сборнике: Технологии очистки воды "ТЕХНОВОД-2023". Материалы XIV Международной научно-практической конференции. Новочеркасск, 2023. С. – 96 – 101.
10. Продоус О.А., Якубчик П.П., Балашов С.С. Количественная оценка эффективности работы металлических сетей водоснабжения // В сборнике: Яковлевские чтения – 2023. Системы водоснабжения и водоотведения. Современные проблемы и решения. сборник докладов участников XVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева. НИУ МГСУ. 2023. Москва, С. – 64 – 70.
11. Продоус О.А., Шлычков Д.И., Якубчик П.П. Причины и последствия изменения значений гидравлических характеристик металлических сетей водоснабжения и водоотведения в процессе их эксплуатации // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13. № 3 (52). С. – 42 – 49.
12. Продоус О.А., Якубчик П.П., Шлычков Д.И., Балашов С.С. Новая зависимость для гидравлического расчета металлических водопроводов с внутренними отложениями // Приволжский научный журнал. 2024. № 1 (69). С. – 61 – 69.
13. Продоус О.А., Якубчик П.П., Балашов С.С. Последствия, возникающие при уменьшении диаметров труб металлических коммунальных и тепловых сетей. // "Инженерные системы" АВОК Северо-Запад. №1. 2026. – С. – 62.65.
14. Продоус О.А., Якубчик П.П., Шипилов А.А., Шлычков Д.И. Рекомендации по оценке эффективности эксплуатации изношенных водопроводных и канализационных сети с внутренними отложениями. // Издательство "Перо". Санкт-Петербург-Москва. 2025. – 60 С.

Assessment of pump energy consumption as the thickness of the deposits in water supply pipes changes

Balashov S.S.
Alexander I St. Petersburg State University of Railway Engineering

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

This article examines the effect of the thickness of the internal deposit layer in metal pipes on changes in hydraulic head characteristics and the energy consumption of pumping equipment in water supply networks. The topic of this article is related to the widespread use of steel and cast-iron pipes in existing water supply networks across various regions of the country and the resulting decrease in their hydraulic efficiency during operation due to the buildup of deposits on the inner surfaces of the pipes [1].

The methodological basis of this article follows the approach outlined in the publications by O.A. Prodous and his co-authors, where the hydraulic analysis of metal pipelines with internal deposits is considered an essential element for assessing the operational condition of worn-out water supply networks [2–4].

The objective of this work is to establish a quantitative relationship between the thickness of the internal deposit layer, the actual internal diameter of the pipes, the hydraulic head, and the actual energy consumption of the pumping equipment. It has been established that a reduction in the diameter of pipes with deposits leads to changes in flow velocity, the actual hydraulic head, and the pump's energy consumption.

Keywords: metal pipes, operation, internal deposits, energy consumption.

References

1. Prodous, O.A., Yakubchik, P.P., and Shlychkov, D.I. "Features of Hydraulic Design of Water Supply Systems Made of Metal, Polymer, and Metal-Polymer Pipes" // Terminological Dictionary... – Moscow: Pero Publishing House, 2023. – pp. – 288.
2. Prodous, O.A., Yakubchik, P.P., et al. Recommendations for Assessing the Operational Efficiency of Worn Water Supply and Sewer Networks with Internal Deposits. – St. Petersburg–Moscow: Perro Publishing House, 2025. pp. – 58
3. Shevelyov, F.A., Shevelyov, A.F. Tables for the Hydraulic Design of Water Supply Pipes. – Moscow: Bastet, 2016. p. 382.
4. Prodous, O.A., Shipilov, A.A., et al. A Hydraulic Criterion for Justifying the Need to Develop Reconstruction Projects for Water Supply Networks Made of Metal Pipes // Water Systems and Technologies. Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering. 2020. No. 1. pp. 26–31.
5. Prodous, O.A., Yakubchik, P.P., Balashov, S.S. Improvement of Hydraulic Calculations for Metal Water Pipelines Using the "GRIT" Software // Proceedings of St. Petersburg University of Railway Engineering. 2026. Vol. 23. No. 1. pp. 139–145.
6. Prodous, O.A., Shlychkov, D.I., Yakubchik, P.P., and Parkhomenko, S.V. "The Effect of the Thickness of the Internal Deposits Layer in Water Supply and Wastewater Disposal Pipelines on the Duration of Their Remaining Service Life" // Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering. 2022. Vol. 17, No. 6. pp. 738–746.
7. Prodous, O.A., Shlychkov, D.I. Systematization of Hydraulic Calculations for Metal Water Supply and Wastewater Distribution Networks with Internal Deposits on Pipe Walls // Construction: Science and Education. Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). 2022. Vol. 12, No. 3, Art. 7. Moscow. pp. 115–124.
8. Prodous, O.A., Yakubchik, P.P., Balashov, S.S. On Improving the Accuracy of Hydraulic Calculations for Metal Water Pipelines with Internal Deposits // In: Water Treatment Technologies "TEKHNOVOD-2023." Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference. Novocherkassk, 2023. pp. 80–85.
9. Prodous, O.A., Yakubchik, P.P., Balashov S.S. On the Influence of the Thickness of the Internal Deposits Layer in Metal Water Pipes on the Magnitude of Actual Head Losses in Pipes // In the collection: Water Treatment Technologies "TEKHNOVOD 2023." Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference. Novocherkassk, 2023. pp. 96–101.
10. Prodous, O.A., Yakubchik, P.P., Balashov, S.S. Quantitative Assessment of the Efficiency of Metal Water Supply Networks // In: Yakovlev Readings – 2023. Water Supply and Wastewater Systems. Contemporary Problems and Solutions. Collection of papers by participants in the 18th International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of RAS Academician S.V. Yakovlev. Moscow State University of Civil Engineering. 2023. Moscow, pp. 64–70.
11. Prodous, O.A., Shlychkov, D.I., Yakubchik, P.P. Causes and Consequences of Changes in the Hydraulic Characteristics of Metal Water Supply and Wastewater Distribution Networks During Their Operation // Urban Planning and Architecture. 2023. Vol. 13, No. 3 (52). pp. 42–49.
12. Prodous, O.A., Yakubchik, P.P., Shlychkov, D.I., Balashov, S.S. A New Equation for the Hydraulic Design of Metal Water Pipelines with Internal Deposits // Volga Scientific Journal. 2024. No. 1 (69). pp. 61–69.
13. Prodous, O.A., Yakubchik, P.P., Balashov, S.S. Consequences of Reducing Pipe Diameters in Metal Utility and Heating Networks. // "Engineering Systems," AVOK Northwest. No. 1. 2026. – pp. 62–65.
14. Prodous, O.A., Yakubchik, P.P., Shipilov, A.A., Shlychkov, D.I. Recommendations for evaluating the operational efficiency of worn-out water supply and sewer networks with internal deposits. // "Pero" Publishing House. St. Petersburg–Moscow. 2025. – 60 pp.