

УДК 628.2/691.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-173-179

О.А. ПРОДОУС<sup>1</sup>, А.А. МАЛЫШЕВА<sup>2</sup>,  
И.А. АБРОСИМОВА<sup>2</sup>, А.Г. ЧЕЛОНЕНКО<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>ООО «ИНКО-эксперт»,

<sup>2</sup>Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА САМОТЕЧНЫХ СЕТЕЙ ВОДООТВЕДЕНИЯ С ВНУТРЕННИМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ

**Аннотация.** Статья посвящена обзору формул для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с внутренними отложениями. В существующей практике расчета самотечных сетей существуют методики гидравлического расчета только для новых труб. При этом на стенках трубопроводов при определенных условиях могут образовываться слои отложения с разной структурой, которые влияют на значения гидравлических характеристик системы.

Целью работы является выявление расчетных зависимостей для трубопроводов с отложениями в самотечных сетях водоотведения.

Использованы гипотезы и формулы по расчету трубопроводов, а также существующие положения нормативной документации в области водоотведения.

Выявлены расчетные зависимости для трубопроводов с отложениями, введено понятие приведенного диаметра труб.

Выделены направления дальнейшего изучения влияния толщины слоя отложений в лотковой части труб на значения их гидравлических характеристик и необходимости разработки таблиц для гидравлического расчета труб самотечных сетей водоотведения с внутренними отложениями.

**Ключевые слова:** самотечные сети, гидравлический расчёт, внутренние отложения, расчётная зависимость, уточненная формула

**Для цитирования:** Продоус О.А., Малышева А.А., Абросимова И.А., Челоненко А.Г. Особенности гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с внутренними отложениями // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 173–179.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-173-179

O.A. PRODOUS<sup>1</sup>, A.A. MALYSHEVA<sup>2</sup>,  
I.A. ABROSIMOVA<sup>2</sup>, A.G. CHELONENKO<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>ООО “INCO-expert”,

<sup>2</sup>The National Research Moscow State University of Civil Engineering

## HYDRAULIC ANALYSIS OF GRAVITY FLOW WATER DISTRIBUTION WITH INTERNAL DEPOSITS

**Abstract. Purpose:** The purpose of this work is to suggest dependencies for pipelines with deposits in gravity flow water distribution systems. **Methodology/approach:** Hypotheses and formulas for the pipeline hydraulic analysis; regulatory documents on the water disposal. **Research findings:** The paper presents the hydraulic analysis equations of gravity flow water distribution with internal deposits. The current regulatory documents contain methods of the hy-

draulic analysis for new pipelines only. At the same time, deposits of various structure can appear on the pipeline walls under certain conditions, which affect the hydraulic parameters of the system. The dependences are suggested for pipelines with deposits and the concept is proposed for the reduced pipe diameter. *Value:* Further directions are identified for studying the influence of the thickness of the sediment layer in the pipeline on its hydraulic properties. A need for tabulating the results of the hydraulic analysis of pipes with gravity flow distribution with internal deposits is substantiated.

**Keywords:** gravity flow water distribution, hydraulic analysis, internal deposits, dependencies, refined formula

**For citation:** Prodous O.A., Malysheva A.A., Abrosimova I.A., Chelonenko A.G. Osobennosti gidravlicheskogo rascheta samotechnykh setei vodoootvedeniya s vnutrennimi otlozheniyami [Hydraulic analysis of gravity flow water distribution with internal deposits]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 3. Pp. 173–179. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-173-179

### Введение

Гидравлический расчет самотечных труб с отложениями заключается в определении их фактического внутреннего диаметра  $d_{\text{вн}}$ , фактической скорости  $V_{\text{ф}}$  и фактического уклона при заданном расходе, т. е. к определению значений фактических характеристик гидравлического потенциала труб для неравномерного самотечного потока сточной жидкости.

Основной вклад в решение задач по расчету трубопроводов внесли А. Шези и Н.Ф. Федоров.

Антуан Шези (1718–1798) – французский инженер-гидравлик. Является автором формулы для определения средней скорости потока при установившемся равномерном турбулентном движении жидкости в области квадратичного сопротивления для случая безнапорного потока. Впервые опубликовал ее в 1769 г.

Николай Федорович Федоров (1910–1990) – инженер, педагог, учёный, крупный специалист в области защиты окружающей среды и комплексных исследований санитарного состояния водоёмов северо-запада России, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РСФСР. Предложил универсальную формулу для расчёта канализационных сетей.

Существуют две методики гидравлического расчета самотечных сетей.

Первая методика – для самотечных потоков при турбулентном режиме в зоне шероховатого трения, вторая – для самотечных потоков при любом из двух возможных режимов движения: шероховатой и переходной области между ними. В результате сравнения значений характеристик гидравлического потенциала труб по формуле А. Шези и формуле Н.Ф. Федорова даем преимущество формуле А. Шези.

### Методы

В первой методике гидравлического расчета самотечных сетей используются уравнения неразрывности потока

$$q = \omega V = \frac{V \cdot \pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4}, \quad (1)$$

где  $q$  – заданный расход, м<sup>3</sup>/с;  $\omega = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4}$  – площадь живого сечения трубы, м<sup>2</sup>;  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр труб, м, и гипотезы А. Шези – применения при расчете вместо  $d_{\text{вн}}$  значения гидравлического радиуса труб  $R = d_{\text{вн}}/4$  м в формуле А. Шези, имеющей вид

$$V = C\sqrt{R \cdot i}, \quad (2)$$

где  $C$  – коэффициент А. Шези, определяемый по формуле Н.Н. Павловского в диапазоне значений  $0,1 < R < 3$ ;  $R$  – гидравлический радиус, м;  $i$  – гидравлический уклон, м/м, м,

$$C = \frac{R^y}{n}. \quad (3)$$

Для расчетов используют значение показателя степени  $y$  в формуле (3):

$$y = 1,5 \cdot n, \quad (4)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости стенок труб.

Для расчетов используют значение  $n$  в диапазоне величин  $n = 0,012-0,014$ .

Вторая методика базируется на использовании уравнения (1) и формулы Н.Ф. Федорова, имеющей вид

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 Lg \left( \frac{\Delta}{13,68R} + \frac{\alpha_2}{\text{Re}} \right), \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления, входящий в формулу

Дарси – Вейсбаха  $i = \lambda \frac{V^2}{2g \cdot d_{\text{вн}}}$ , мм/м (м/м);  $\Delta$  и  $\alpha_2$  – величины, назначаемые

в зависимости от структуры шероховатости стенок труб и характера сточной жидкости. На практике используют значения в диапазоне величин:  $0,6 \leq \Delta \leq 2,0$  мм;  $70 \leq \alpha_2 \leq 100$  [1];  $R$  – гидравлический радиус, м;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости сточной жидкости, зависящий от ее температуры, м<sup>2</sup>/с.

Эти формулы для гидравлического расчета актуальны только для новых трубопроводов с равномерным движением сточных вод. Однако на практике движение неравномерное, что приводит к образованию слоя отложений [2].

Основной причиной образования отложений в лотковой части самотечных сетей водоотведения является неравномерность движения сточных вод, обусловленная:

- скоростным режимом потока, когда  $V_{\text{ф}} \leq V_{\text{min}}$ , м/с [3];
- влиянием местных сопротивлений, тормозящих самотечный поток (повороты, отводы, тройники и др.) [6];
- влиянием боковых присоединений и перепадов местных отметок сети [13];
- просадками трассы и наличием в лотковой части труб крупных механических частиц, тормозящих поток (гравий, щебень, ветки деревьев и др.) [12].

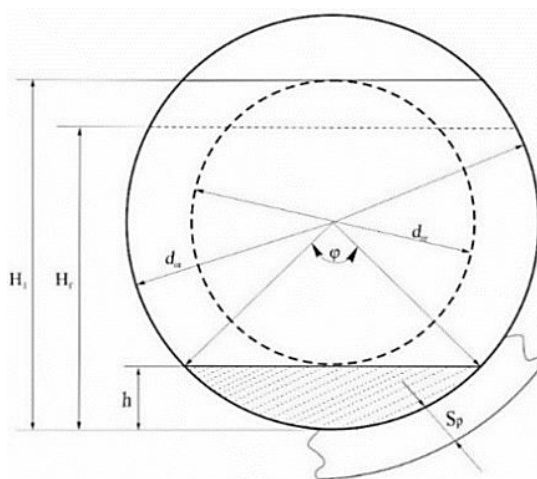
В настоящее время не существует формулы для гидравлического расчета трубопроводов с отложениями в лотковой части труб [7].

Если анализировать нормативный документ по проектированию наружной канализации СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения», то его содержание не предусматривает гидравлический расчет трубопроводов с отложениями.

Однако п. 5.2.1 вышеуказанного документа содержит следующее: «Гидравлический расчет канализационных самотечных трубопроводов (лотков, каналов) следует выполнять на расчетный максимальный секундный расход сточных вод по таблицам, графикам и номограммам. Основное требование при проектировании самотечных трубопроводов – пропуск расчетных расходов при самоочищающих скоростях движения транспортируемых сточных вод» [9].

### Результаты

На практике при нарушении скоростного режима потока в лотковой части труб возможно образование отложений, влияющих на значения величин характеристик гидравлического потенциала труб  $d_{\text{вн}}$ ,  $V$ ,  $i$ , входящих в расчетную формулу (2). Однако формула (2) не учитывает толщину слоя отложений  $h$  (рисунок).



Геометрические параметры потока в самотечных сетях водоотведения:

$d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр;  $d_n$  – наружный диаметр;  $S_p$  – толщина стенки трубы;  $h$  – толщина слоя отложений;  $H_{\text{ф}}$  – фактическое наполнение;  $H$  – степень наполнения в новой трубе;  $\varphi$  – угол между хордами, соединяющими границы поверхности осадка с центром трубы

Поэтому рекомендуется использовать при гидравлических расчетах самотечных сетей водоотведения уточненную О.А. Продоусом и Д.И. Шлычковым формулу А. Шези, имеющую вид [3, 5, 8]:

$$i = \frac{4 \cdot V^2}{C^2 \cdot d_{\text{пр}}}, \quad (6)$$

где  $V$  – скорость установившегося потока, м/с;  $C$  – коэффициент А. Шези, определяемый по формуле (3);  $d_{пр}$  – приведенный диаметр, м, определяемый по формуле

$$d_{пр} = \sqrt{(d_n)^2 - (d_{вн} - h)^2}, \quad (7)$$

где  $d_n$  – наружный диаметр труб по государственному стандарту, м;  $S_p$  – толщина стенки трубы для конкретного вида материала по государственному стандарту, м;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр труб по государственному стандарту, м;  $h$  – толщина слоя отложений, м.

С учетом формулы (7) окончательный вид расчетной зависимости для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения приобретает вид

$$i = \frac{4 \cdot V^2}{C^2 \sqrt{(d_n)^2 - (d_{вн} - h)^2}}. \quad (8)$$

Таким образом, использование при расчетах уточненного вида формулы А. Шези (8) позволяет существенно уточнять гидравлический расчет самотечных сетей с отложениями в лотковой части труб и обеспечивать прогнозирование возможности их дальнейшей эксплуатации.

В качестве будущих направлений исследования необходимо выделить:

1. Изучение структуры слоя отложений и механизма их образования [10].
2. Приведенные формулы являются основанием для составления таблиц для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб [4, 11].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чупин Р.В. Оптимизация развивающихся систем водоотведения. Иркутск : Изд-во ИрГТУ. 2015. 418 с.
2. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Прогнозирование возможности продолжения эксплуатации самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4. С. 646–653. URL: <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-4-646-653>
3. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Механизм образования слоя отложений в лотковой части труб самотечных сетей водоотведения // Известия вузов. Строительство. 2021. № 6 (750). С. 95–98.
4. Продоус О.А., Новиков М.Г., Кривоносов С.И. Рекомендации по гидродинамической очистке и телевизионной диагностике сетей водоотведения / Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт Академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова. Санкт-Петербург, 2001. 36 с.
5. Продоус О.А. Зависимость продолжительности исследования металлических трубопроводов водоснабжения от толщины слоя отложений на внутренней поверхности труб // Яковлевские чтения : сб. докладов XV Международной научно-технической конференции, 19 марта 2020 г. Москва : Изд-во МИСИ – МГСУ, 2020. С. 113–117. URL: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/>
6. Продоус О.А. Методика оценки продолжительности использования металлических трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2021. № 1 (157). С. 4–10.

7. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Об изменении значений гидравлических характеристик напорных канализационных коллекторов из стальных и чугунных труб с внутренними отложениями // Известия вузов. Строительство. 2020. № 12 (744). С. 70–77.
8. Ботук Б.О., Федоров Н.Ф. Канализационные сети. Москва : Стандарт, 1976. 272 с.
9. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб : справочное пособие. Москва : Издательский дом «Бастет», 2016. 428 с.
10. Шлычков Д.И. Проблемы технического состояния действующих трубопроводных систем // Инновации и инвестиции. 2020. № 4. С. 207–210.
11. Shlychkov D. Energy-saving as an integral part of technical and economic efficiency // Opcion. 2019. T. 35. № 24 (Special Edition). P. 1626–1636.
12. Carsten Ulrich Schwermera, Wolfgang Uhlabc. Calculating expected effects of treatment effectivity and river flow rates on the contribution of WWTP effluent to the ARG load of a receiving river // Journal of Environmental Management. 2021 № 288. P. 2–14.
13. Cezary Madryas, Bogdan Przybyła. Inspection of pipes as an element of operating municipal sewerage networks // Tunnelling and Underground Space Technology. 1998. V. 13, I. 1. P. 57–64. ISSN 0886-7798. URL: [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(98\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(98)00026-1)

#### REFERENCES

1. Chupin R.V. Optimizatsiya razvivayushchikhsya sistem vodootvedeniya [Optimization of wastewater system development]. Irkutsk, 2015. 418 p. (rus)
2. Prodous O.A., Shlychkov D.I. Prognozirovanie vozmozhnosti prodolzheniya ekspluatatsii samotekhnicheskikh setei vodootvedeniya s otlozheniyami v lotkovoi chasti trub [Forecasting the possibility of continual operation of gravity flowwater systems with deposits in pipes]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2021. V. 11. No. 4. Pp. 646–653. DOI: 0.21285/2227-2917-2021-4-646-653 (rus)
3. Prodous O.A., Shlychkov D.I. Mekhanizm obrazovaniya sloya otlozhenii v lotkovoi chasti trub samotekhnicheskikh setei vodootvedeniya [Formation of deposit layers in the flume part of pipes of gravity flow networks]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2021. No. 6 (750). Pp. 95–98. (rus)
4. Prodous O.A., Novikov M.G., Krivososov S.I. Rekomendatsii po gidrodinamicheskoi ochistke i televisionnoi diagnostike setei vodootvedeniya [Recommendations for hydrodynamic cleaning and television diagnostics of water disposal systems]. Saint-Petersburg, 2001. 36 p. (rus)
5. Prodous O.A. Zavisimost' prodolzhitel'nosti issledovaniya metallicheskh truboprovodov vodosnabzheniya ot tolshchiny sloya otlozhenii na vnutrennei poverkhnosti trub [Duration of the study of metal water supply vs. deposit layer thickness on the inner pipe surface]. In: Yakovlevskie chteniya sb. dokladov 15 Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Coll. Papers 15th Int. Sci. Conf.). Moscow, 2020. Pp. 113–117. Available: <http://mgssu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/otkr-dostupa/> (rus)
6. Prodous O.A. Metodika otsenki prodolzhitel'nosti ispol'zovaniya metallicheskh truboprovodov sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya [Evaluation methodology of metal pipeline operation for water supply and drainage systems]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2021. No. 1 (157). Pp. 4–10. (rus)
7. Prodous O.A., Shlychkov D.I. Ob izmenenii znachenii gidravlicheskikh kharakteristik napornykh kanalizatsionnykh kollektorov iz stal'nykh i chugunnykh trub s vnutrennimi otlozheniyami [Hydraulic parameters of pressure sewer headers made of steel and cast-iron pipes with internal deposits]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2020. No. 12 (744). Pp. 70–77. (rus)
8. Botuk B.O., Fedorov N.F. Kanalizatsionnye seti [Sewer networks]. Moscow: Standart, 1976. 272 p. (rus)
9. Shevelev F.A., Shevelev A.F. Tablitsy dlya gidravlicheskogo rascheta vodoprovodnykh trub [Tables for hydraulic analysis of water pipes]. Moscow: Bastet, 2016. 428 p. (rus)
10. Shlychkov D.I. Problemy tekhnicheskogo sostoyaniya deistvuyushchikh truboprovodnykh sistem [Technical condition of pipeline systems]. *Innovatsii i investitsii*. 2020. No. 4. Pp. 207–210. (rus)
11. Shlychkov D. Energy-saving as an integral part of technical and economic efficiency [Energy-saving as an integral part of technical and economic efficiency]. *Opcion*. 2019. V. 35. No. 24 (Special edition). Pp. 1626–1636. (rus)

12. Carsten Ulrich Schwermera, Wolfgang Uhlabc. Calculating expected effects of treatment effectiveness and river flow rates on the contribution of WWTP effluent to the ARG load of a receiving river. *Journal of Environmental Management*. 2021. No. 288. Pp. 2–14.
13. Cezary Madryas, Bogdan Przybyła. Inspection of pipes as an element of operating municipal sewerage networks. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 1998. V. 13. No. 1. Pp. 57–64. DOI: 10.1016/S0886-7798(98)00026-1

#### **Сведения об авторах**

*Продоус Олег Александрович*, докт. техн. наук, профессор, генеральный директор, ООО «ИНКО-эксперт», 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 37/1, лит. А, пом. 1-Н, pro@enco.su

*Малышева Анна Александровна*, канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, MalyshevaAA@mgsu.ru

*Абросимова Иванна Александровна*, преподаватель, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, AbrosimovaIA@mgsu.ru

*Челоненко Андрей Геннадьевич*, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, andreicelonenco@mail.ru

#### **Authors Details**

*Oleg A. Prodous*, DSc, Professor, Director General ООО "INCO-expert", 37/1, Moskovskii Ave., 190005, St.-Petersburg, Russia, pro@enco.su

*Anna A. Malysheva*, PhD, A/Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26, Yaroslavskoye Shosse, 129337, Moscow, Russia, MalyshevaAA@mgsu.ru

*Ivanna A. Abrosimova*, Lecturer, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, AbrosimovaIA@mgsu.ru

*Andrey G. Chelonenko*, Student, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, andreicelonenco@mail.ru