

Н.А. Черников, К.М. Дюба

ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация**СУЩЕСТВУЮЩИЕ ТЕНДЕНЦИИ В ПРОВЕДЕНИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ
РАСЧЕТОВ САМОТЕЧНЫХ СЕТЕЙ ВОДООТВЕДЕНИЯ**

Традиционная методика расчета канализационных сетей не включает в себя современные исследования в данной области. В статье рассмотрены ключевые работы по тематике расчета канализационных сетей, выявлены их особенности и намечены основные направления модернизации традиционной методики.

Ключевые слова: водоотведение; канализационная сеть; гидравлический расчет; обобщение опыта.

Одна из основных задач при проектировании сетей водоотведения – определение расчетного расхода сточных вод. Согласно требованиям актуализированного СНиП [1], канализационная сеть должна пропускать расчетный расход при незаиливающих скоростях. По сравнению с предыдущей редакцией СНиП [2], актуализированная версия [1] не содержит четко сформулированной методики гидравлического расчета. Это дает возможность критически подойти к вопросу проектирования канализационных сетей, объединив традиционную методику, использованную в СНиП [2], с современными исследованиями вопроса проектирования самотечных сетей.

**Традиционная методика
гидравлического расчета сетей**

Расчет самотечных трубопроводов заключается в определении их диаметра, уклона и параметров их работы – наполнения и скорости. Обычно предварительно определяется расход, который является исходным для расчета. Полученные результаты должны удовлетворять технологическим и экономическим требованиям.

Расчет канализационных сетей производится из условия равномерного движения жидкости в трубах по двум основным формулам – формуле постоянства расхода (1) и формуле Шези (2):

$$q = \omega \cdot V, \quad (1)$$

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

где q – расход жидкости, протекающей в единицу времени, м³/с;

ω – площадь сечения, заполненного жидкостью (живого сечения), м²;

V – скорость движения жидкости в единицу времени, м/с;

R – гидравлический радиус, м;

i – гидравлический уклон;

C – коэффициент, зависящий от гидравлического радиуса R и коэффициента шероховатости смоченной поверхности трубопровода n ; может быть определен по формуле акад. Н. Н. Павловского:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y, \quad (3)$$

$$y = 2,5 \cdot \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \cdot \sqrt{R} \cdot (\sqrt{n} - 0,1), \quad (4)$$

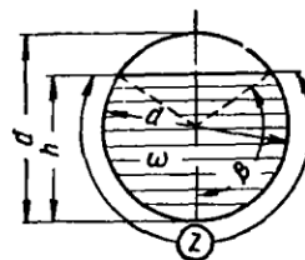


Рис. 1. Гидравлические элементы круглого сечения

1. Наполнение – отношение высоты заполнения h к диаметру трубы d

$$\frac{h}{d} = \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (5)$$

2. Площадь живого сечения

$$\omega = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\beta}{180^\circ} - \frac{\sin^2 \beta}{2} \right) \cdot d^2, \quad (6)$$

3. Смоченный периметр

$$\chi = \pi \cdot d \cdot \frac{\beta}{180^\circ}, \quad (7)$$

4. Гидравлический радиус

$$R = \omega \cdot \chi, \quad (8)$$

Из формул (5) – (8) видно, что величины ω , χ , R , являются функциями диаметра и степени наполнения, так как угол β представляет собой функцию степени наполнения h/d .

Существует также методика расчета по формуле (1) и формуле Дарси (9):

$$i = \frac{\lambda}{4R} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (9),$$

где λ — коэффициент гидравлического трения, определяемый по формуле Н.Ф.Федорова (10):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -21g \left(\frac{\Delta_3}{13,48R} + \frac{a_2}{Re} \right), \quad (10).$$

Здесь Δ_3 — эквивалентная абсолютная шероховатость;

a_2 — коэффициент, учитывающий характер шероховатости стенок труб;

$$Re = \frac{4R \cdot V}{\nu} \text{ — число Рейнольдса;}$$

ν — кинематический коэффициент вязкости.

С учетом соотношения $C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$, формула (9)

преобразовывается в формулу (2).

По формуле (10) коэффициент λ зависит не только от относительной шероховатости, но и от числа Рейнольдса. Эта формула справедлива для всех трех областей турбулентного режима движения жидкости: областей гладкого, вполне шероховатого трения и переходной области между ними. Исследования показали, что трубопроводы водоотводящих сетей работают в области вполне шероховатого трения. Для возможных условий проектирования расчеты по формулам (1) - (3) и (9) - (10) дают практически одинаковые результаты. [3]

При выполнении гидравлического расчета существуют следующие ограничения, указанные в [2]:

1. приведенная выше методика не учитывает колебания расхода по времени, вследствие чего расчетное наполнение имеет верхний предел, составляющий для производственно-бытовых сетей 0,6...0,8 в зависимости от диаметра трубопровода;

2. трубопроводы должны быть проложены с уклоном, обеспечивающим самоочищение труб от осаждающихся загрязнений при достижении расчетного расхода. Это требование устанавливает нижние пределы скорости и уклона трубопровода в зависимости от диаметра;

3. во избежание преждевременного истирания внутренней поверхности трубопровода частицами загрязнений расчетная скорость имеет верхний предел, составляющий 4...8 м/с в зависимости от материала трубопровода.

Традиционная методика гидравлического расчета сетей широко применяется в проектировании самотечных сетей и до введения в действие актуализированного СНиП [1] являлась

стандартом проектирования. В то же время, она обладает рядом недостатков, устранение которых позволит привести ее в соответствие с современными исследованиями в области гидравлических расчетов самотечных сетей. К таким недостаткам относятся:

- недостаточная эффективность расчета характеристик подлежащих реконструкции сетей;
- отсутствие учета влияния особенностей сечения трубопровода на гидравлические характеристики потока;
- проведение расчетов на фиксированный постоянный расход, равный максимальному секундному.

Определение оптимального диаметра переустраиваемого участка сети

Исследования [4] посвящены определению оптимального диаметра для участка сети, подлежащего реконструкции. Основываясь на традиционном подходе к расчету сетей, Е. П. Ветров и А. И. Сергеев определили, что при снижении наполнения менее $0,3D$ скорость течения стоков значительно снижается по сравнению с аналогичным снижением наполнения в диапазоне $[0,3D; 0,5D]$, а при наполнении менее $0,1D$ скорость резко падает. Таким образом, принятие расчетного наполнения менее $0,3D$ не рекомендуется, а менее $0,1D$ — нецелесообразно.

Применяя полученные данные о минимальном наполнении, авторами были составлены таблицы рекомендуемых диапазонов расходов и скоростей, а также рекомендуемых уклонов, необходимых для пропуска расхода с нормативными скоростями при минимальном наполнении для различных диаметров трубопроводов.

Данные таблиц позволили сформулировать алгоритм подбора оптимального диаметра переустраиваемого участка водоотводящей сети. Принимая в первом приближении гидравлический уклон i равным существующему либо уклону местности, авторы рекомендуют определять диапазон гидравлических радиусов, необходимых для соблюдения правила неуменьшения диаметра и скорости последующих участков сети по формуле (11).

$$R = \sqrt[4]{\left(\frac{V^2}{5102,2i} \right)^3}, \quad (11).$$

Минимальный гидравлический радиус определяется по скорости на предыдущем участке, максимальный - по скорости на последующем. По диапазону гидравлических радиусов определяется диапазон диаметров, удовлетворяющих вышеуказанным правилам, после чего из диапазона

выбирается диаметр, соответствующий выпускаемым сортаментам труб.

Данная методика адаптирует традиционный подход к гидравлическому расчету под требования, предъявляемые к реконструируемым сетям. Ключевым недостатком данной методики является то, что она использует усредненные по различным сечениям показатели трубопроводов и не рассматривает вопрос колебания расходов в трубопроводе.

Двумерная модель равномерного безнапорного потока в круглых трубопроводах сетей водоотведения

Исследования В. С. Дикаревского и И. М. Охременко [5] показали, что традиционная методика не в полной мере описывает движение сточных вод в трубопроводах круглого сечения. Так в круглых трубах недостаточно использовать только параметр гидравлического радиуса, поскольку это приводит к завышению средних скоростей и расхода в трубопроводах. Канализационная сеть, спроектированная по традиционной методике как работающая с незаиливающими скоростями, реально будет находиться в состоянии заиливания.

Предлагаемая И. М. Охременко методика гидравлического расчёта бытовой сети водоотведения основана на двумерной модели равномерного безнапорного потока при различных наполнениях круглых трубопроводов систем водоотведения и исследованиях движения сточной жидкости Н. Ф. Федорова. Эта методика позволяет вести расчеты по выше приведенным формулам турбулентного потока (9) и (10) с учетом влияния его формы на гидравлические параметры.

Базовой функциональной зависимостью является $\lambda = f\left(\frac{D}{r}; \text{Re}; N\right)$, где N – совокупность параметров, учитывающих особенности изменения геометрических характеристик потока в зависимости от степени наполнения труб.

Средняя скорость течения в общем виде определяется соотношением:

$$V_{cp} = \frac{1}{\omega} \iint_{\omega} \bar{V}_x \quad (12).$$

Полученные в результате решения двумерной задачи зависимости расхода в л/с и средней скорости в м/с от наполнения трубопровода при различных уклонах, наиболее часто встречающихся на практике, сведены в номограммы и таблицы для гидравлического расчета бытовых сетей водоотведения [5].

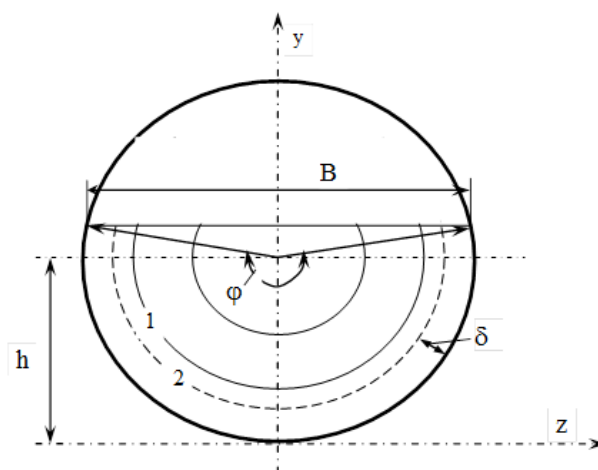


Рис. 2. Расчетная схема определения параметров безнапорного потока в круглой трубе
1 - линии равных скоростей - изотахи, 2 - граница пограничного слоя

Особо важно отметить тот факт, что согласно исследованиям В. С. Дикаревского и И. М. Охременко пропускная способность самотечных трубопроводов круглого сечения постоянно растет с увеличением наполнения и достигает максимального значения при полном наполнении, а не при наполнении 0,9...0,95, на которое указывает традиционная методика.

Таким образом, данная модель дает более точную картину движения стоков по трубопроводам круглого сечения по сравнению с традиционной методикой. Вместе с этим, модель рассматривает лишь часть расчета, связанную с определением гидравлических характеристик потока, вынося за скобки вопросы колебания расходов.

Учет изменения расходов за расчетный период водоотведения

Традиционная методика гидравлического расчета построена на положении, что движение жидкости в трубах является равномерным и максимальный расход сточных вод, принятый расчетным, не меняется со временем. На практике канализационная сеть значительную часть эксплуатационного периода работает с меньшим расходом и, соответственно, меньшей скоростью движения сточных вод. Это приводит к выпадению осадка в трубах и колодцах, снижению рабочих параметров трубопроводов и увеличению необходимого числа прочисток канализационных сетей. Т. о. трубопроводы при расходах меньше расчетного работают с нарушениями требований СНиП.

В ходе исследований, проведенных в ПГУПС [6]-[8], было выявлено, что более оправдано проводить гидравлический расчет на диапазон расходов от начального расхода в пусковой период

до максимального расхода, соответствующего расчетному расходу по традиционной методике. Установлено, что наиболее эффективный диапазон расчетных расходов для различных трубопроводов с точки зрения повышения вероятности нахождения в нем фактического расхода зависит от диаметра трубы d (и, следовательно, от коэффициента общей неравномерности расхода сточных вод $K_{обц}$) и находится в интервале от $(0,6...1) \cdot q_{max}$ при $d = 200$ мм до $1,0 \cdot q_{max}$ при $d \geq 500$ мм.

Авторами исследований выявлена предельная зависимость для предлагаемого метода гидравлического расчета бытовых сетей водоотведения:

$$I_{пр} = \frac{I_{тр}}{0,329 + 0,671 \cdot \frac{q_1}{q_2}}, \quad (13),$$

где $I_{пр}$ — уклон, определенный по предлагаемой предельной зависимости (с использованием расчетного диапазона расходов сточных вод), ‰;

$I_{тр}$ — уклон, определенный по традиционной предельной зависимости (по максимальному расчетному расходу сточных вод), ‰;

q_1 — минимальный расчетный расход, л/с;

q_2 — максимальный расчетный расход, л/с.

Результаты исследований позволяют проектировать самотечные сети, работающие с соблюдением нормативных требований в достаточно широком диапазоне расходов, однако основные параметры таких сетей будут рассчитаны на максимальные расходы (в пусковой период и на пике эксплуатации), частота появления которых в расчетном сечении невелика. Целесообразным представляется адаптировать рассмотренную методику под расчет сетей на наиболее вероятный расход стоков, определенный по данным эксплуатации для реконструируемых сетей или по аналогам для вновь проектируемых сетей, используя при этом максимальный секундный расход только для оценки пропускной способности трубопровода.

Комплексное моделирование водоотводящих систем

Работы [9] и [10] посвящены исследованием напорного движения стоков в безнапорных сетях и моделированию водоотводящих систем гидравлическими цепями с нефиксированными отборами и притоками.

Первый этап методики заключается в определении максимальной пропускной способности системы водоотведения, второй — в оценке пропускной способности расчетных нагрузок и определении режима транспортировки стоков, третий — в определении параметров режима. На третьем этапе также производится построение

пъезометрической поверхности транспортируемых стоков.

Такой подход позволяет при использовании реальных данных по состоянию сетей определить наличие и характеристики прототоков и изливов в сети, а также исследовать различные режимы транспортировки стоков при возникновении засоров и других нарушений условий эксплуатации.

Недостатки такого подхода являются прямым продолжением его достоинств. Эта методика рассчитана моделирование системы водоотведения в целом и мало пригодна для проектирования отдельных элементов системы.

Обобщение существующего опыта расчета и проектирования самотечных сетей водоотведения

Традиционная методика гидравлического расчета сетей обладает рассмотренными выше недостатками, которые не позволяют принять ее как полной мере описывающую работу самотечных сетей.

Большинство этих недостатков и способы их устранения рассмотрены в работах [4]-[10], однако исследования в данной области разрознены и в настоящее не объединены в единую систему. Исходя из этого, важным представляется модифицировать существующую методику с отражением следующих принципов:

1. Методика должна позволять адекватно рассчитывать самотечные сети канализации, прокладываемые из используемых на практике трубопроводов круглого сечения из различных материалов.

2. Канализационная сеть, запроектированная по методике, должна учитывать основные требования действующих нормативов.

3. Расчет сети должен проводиться на пропуск наиболее вероятного расхода сточных вод, при этом параметры работы сети должны проверяться для пропуска диапазона возможных расходов заданной обеспеченности.

4. Методика должна позволять рассчитывать как отдельные участки канализационной сети, так и работу всей сети.

5. Методика должна быть ориентирована на практическое использование как проектными, так и эксплуатирующими организациями.

Ключевые особенности предлагаемой и рассмотренных методик сведены в таблицу.

	Расчет отдельных элементов новой сети	Учет особенностей реконструируемой сети	Учет особенностей сечения круглых трубопроводов	Учет колебания расходов в процессе эксплуатации	Расчет параметров всей системы водоотведения	Учет наиболее вероятного расхода стоков	Простота практического применения методики
Традиционная методика	+	-	-	-	-	-	+
Определение оптимального диаметра переустраиваемого участка сети	-	+	-	-	-	-	+
Двумерная модель равномерного безнапорного потока в круглых трубопроводах	+	-	+	-	-	-	+
Учет изменения расходов за расчетный период водоотведения	+	-	-	+	-	-	+
Комплексное моделирование водоотводящих систем	-	+	-	+	+	-	-
Предлагаемая методика	+	+	+	+	+	+	+

Укрупненная блок-схема расчета по предлагаемой методике приведена на рисунке 3.

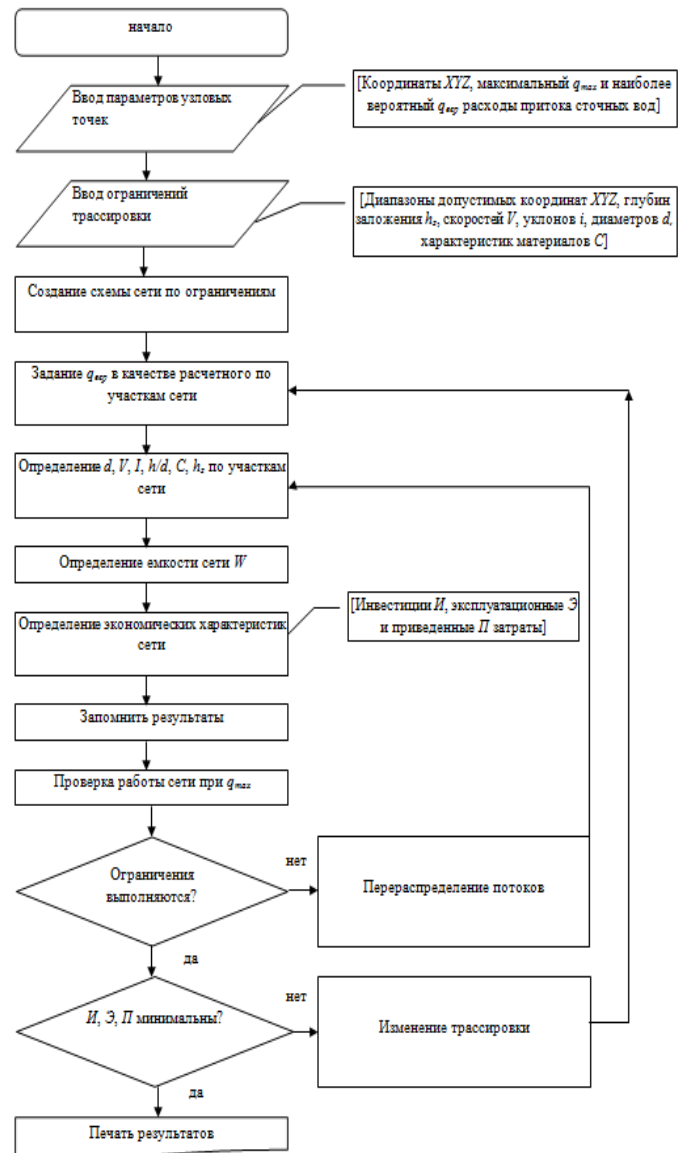


Рис. 3. Укрупненная блок-схема расчета

Литература

1. СП 32.13330.2012. «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85». М.: Минрегион России, 2012.
2. СНиП 2.04.03-85*. «Канализация. Наружные сети и сооружения». М.: ГУП ЦПП, 1996.
3. Ю. В. Воронов, С. В. Яковлев. Водоотведение и очистка сточных вод. Изд. 4-е, дополненное и переработанное. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. - 697 с.
4. Ветров Е. П., Сергеев А. И. Способ выбора оптимальных диаметров самотечных водоотводящих сетей, укладываемых взамен существующих трубопроводов. Вода и экология: Проблемы и решения. 2009, №1. С. 10-23.
5. Охременко И.М. Инструкция по гидравлическому расчету сетей водоотведения на основании решения двумерной задачи определения параметров безнапорного потока в круглой трубе. Ташкент, ТАШИИТ, 1984, 54 с.
6. Башару Т. Особенности гидравлического расчета бытовых сетей водоотведения с учетом изменения расхода сточных вод. Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.04, СПб., 1999, 138 с.
7. Черников Н.А., Башару Т. К вопросу о гидравлическом расчете бытовых сетей водоотведения. 53я научно-техническая конференция с участием

студентов, молодых специалистов и ученых. Программа и Тезисы докладов ПГУПС. Санкт-Петербург, 1993.

8. Черников Н.А., Башару Т. Определение рационального расчетного диапазона сточных вод при проектировании бытовых самотечных сетей водоотведения. ПГУПС -1999.

9. Чупин В. Р., Мелехов Е. С., Чупин Р. В. Развитие методики гидравлических расчетов систем водоотведения. Вода и экология: Проблемы и решения. 2010, №1, 2. С. 48-58.

10. Чупин В. Р., Мелехов Е. С., Чупин Р. В. Напорное движение стоков в безнапорных коллекторах. Водоснабжение и санитарная техника. 2010. №7. – С. 15 - 23.

Автор: ЧЕРНИКОВ Николай Андреевич
ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения», д.т.н, профессор.

Автор: ДЮБА Константин Михайлович
ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения», аспирант.

EXISTING TENDENCY IN THE HYDRAULIC CALCULATION OF THE GRAVITY-FED OF WATER DISPOSAL NET

N.A. Chernikov, K.M. Dyuba

The article describes the traditional method of designing gravity drainage networks and major contemporary work in this area. It is revealed that the traditional method is not effective when calculating reconstructed networks, ignores features of circular section pipes and does not consider changing wastewater flow in time. The main articles, excluding certain shortcomings of the traditional method, are reviewed and their area of use is designated. Key features of a new method that combines the traditional method with modern works in this area are outlined. A schematic block diagram of the hydraulic calculation of gravity networks using the new method is shown.

Keywords: water disposal; sewerage network; hydraulic calculation; generalization of the experience.

ІСНУЮЧІ ТЕНДЕНЦІЇ У ПРОВЕДЕННІ ГІДРАВЛІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ САМОПЛИВНИХ МЕРЕЖ ВОДОВІДВЕДЕННЯ

Н.А. Черніков, К.М. Дюба

Традиційна методика розрахунку каналізаційних мереж не включає в себе сучасні дослідження в даній області. У статті розглянуто ключові роботи за тематикою розрахунку каналізаційних мереж, виявлено їх особливості і намічені основні напрямки модернізації традиційної методики.

Ключові слова: водовідведення; каналізаційна мережа; гідравлічний розрахунок; узагальнення досвіду.