

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

## **ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Методические указания  
для самостоятельной работы

Под общей редакцией доктора технических наук,  
профессора Ю.П. Скачкова

Пенза 2015

УДК 628.2  
ББК 38.776  
Г46

*Методические указания подготовлены в рамках проекта  
«ПГУАС – региональный центр повышения качества подготовки  
высококвалифицированных кадров строительной отрасли»  
(конкурс Министерства образования и науки Российской Федерации –  
«Кадры для регионов»)*

Рекомендовано Редсоветом университета

Рецензент – кандидат технических наук, доцент,  
кафедры «Водоснабжение, водоотведе-  
ние и гидротехника» И.А. Каледа  
(ПГУАС)

**Гидравлический** расчет напорных трубопроводов водоснаб-  
жения: методические указания для самостоятельной работы / Б.М.  
Гришин, М.В. Бикунова; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П.  
Скачкова. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 14 с.

Рассмотрены вопросы гидравлического расчета простых и сложных трубопроводов в системе водоснабжения.

Методические указание подготовлены на кафедре «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» и базовой кафедре ПГУАС при ООО «Гражданпроект» и предназначены для слушателей программы переподготовки «Инженерное обеспечение зданий и сооружений».

© Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства, 2015

© Гришин Б.М., Бикунова М.В., 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Состояние окружающей среды и условия проживания населения определяют одну из наиболее острых социальных проблем, прямо или косвенно затрагивающих интересы каждого человека. Актуальность данного вопроса в значительной степени зависит от состояния инженерной инфраструктуры, в первую очередь сетей водоснабжения и водоотведения, играющих важную роль в функциональном жизнеобеспечении населенных мест.

При проектировании канализационной сети обращают внимание на различные гидрогеологические условия, чтобы выбрать нужный материал труб, обеспечивающий длительность службы сети, надежность в эксплуатации, экономичность и простоту строительства. Устройство колодцев и камер весьма дорого, поэтому при проектировании сети следует добиваться наименьшего их числа.

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРОСТЫХ И СЛОЖНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Простой трубопровод – трубопровод, не имеющий ответвлений и состоящий из труб одинакового диаметра, выполненных из одного материала. Движение жидкости в трубопроводе обусловлено напором  $H$ , равным разности напоров в резервуаре-питателе и приемнике (рис.1) или разности напоров в резервуаре-питателе и в струе на выходе из трубы (рис.2), если в резервуар-приемник отсутствует. Если указанная разность напоров не будет изменяться во времени, то движение установившееся.

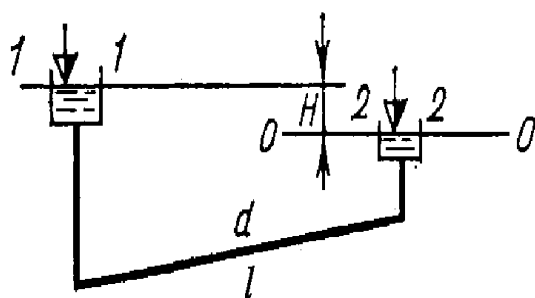


Рис.1

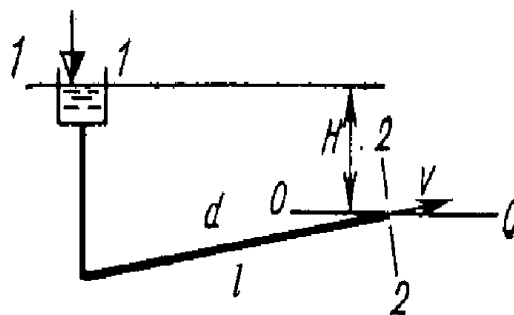


Рис.2

По соотношению напоров, потерянных (затраченных на преодоление сопротивлений движению жидкости) на участках равномерного и неравномерного движения, простые трубопроводы делят на гидравлически длинные и короткие.

В гидравлически длинном (или просто длинном) трубопроводе потери напора по длине настолько превышают местные потери и скоростной напор, что сумму  $\sum h_m + \alpha v^2 / 2g$  не вычисляют, а принимают как некоторую часть потерь по длине  $h_{дл}$ .

При расчетах длинных трубопроводов находят потери напора по длине  $h_{дл}$ , а затем суммарные местные потери напора учитывают, увеличивая значения  $h_{дл}$  на 5...10%.

В гидравлически коротком трубопроводе потери напора по длине и местные потери сопоставимы по значению. При гидравлическом расчете коротких трубопроводов учитывают как местные потери напора, так и потери напора по длине, а в балансе напоров учитывают скоростные напоры в сечениях потока.

По определяемым параметрам и методике расчета простых трубопроводов задачи делят на три группы:

- вычисляют расход  $Q$  при заданном напоре  $H$ , известной длине трубы  $l$  и шероховатости стенок трубы, а также плотности  $\rho$  и вязкости жидкости;

– напор  $H$  при заданном расходе  $Q$  и при известных длине, диаметре и шероховатости трубы, а также плотности и вязкости жидкости;

– необходимый диаметр  $d$  трубы при заданных расходе  $Q$  и напоре  $H$  и известных длине и шероховатости трубы, а также плотности и вязкости жидкости.

Для решения любой из поставленных ранее задач составляют уравнение Бернулли для сечений  $I-I$  и  $2-2$  (см. рис. 1 и 2). Пренебрегая местными потерями и скоростными напорами, получаем

$$H = h_{\text{дл}}.$$

Выразим потери напора через гидравлический уклон  $h_{\text{дл}} = J$ , откуда

$$J = H / l. \quad (1)$$

Подставив формулу (1) в формулу Шези  $v = C\sqrt{RJ}$ , получим

$$v = C\sqrt{RH / l}. \quad (2)$$

Решим уравнение относительно  $H$ , имеем

$$H = v^2 l / (C^2 R). \quad (3)$$

Расход жидкости при равномерном движении

$$Q = \omega C\sqrt{RJ}. \quad (4)$$

Объединив параметры, зависящие от размеров (диаметра) трубы, представим их в виде так называемой расходной характеристики (модуля расхода)

$$K = \omega C\sqrt{R}. \quad (5)$$

Расходная характеристика  $K$  представляет собой расход в данной трубе при гидравлическом уклоне, равном единице. Тогда

$$Q = K\sqrt{J}; \quad (6)$$

$$H = Q^2 l / K^2. \quad (7)$$

Напор также вычисляют по формуле

$$H = A l Q^2, \quad (8)$$

где  $A$  – удельное сопротивление трубопровода;

$$A = 1 / K^2 = 1 / \omega^2 C^2 R. \quad (9)$$

Удельное сопротивление трубопровода численно равно напору, затрачиваемому на единице длины трубопровода при расходе, равном

единице. Раскрывая значения  $A$  в формуле (9) и учитывая, что  $C = \sqrt{8g/\lambda}$ , получим при  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

$$A = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5} = 0,0827\lambda/d^5 = \frac{J}{Q^2} \quad (9 \text{ а})$$

По выведенным формулам решают основные задачи при расчетах простого трубопровода.

Неновые стальные и чугунные трубы, т.е. бывшие в эксплуатации при нормальных условиях («нормальные» трубы), имеют повышенную шероховатость стенок, оцениваемую в среднем высотой выступа условной разнотекстурной («эквивалентной») шероховатости  $\Delta = 1,0 \dots 1,6 \text{ мм}$ .

Для новых чугунных труб среднее значение  $\Delta = 0,55 \text{ мм}$ ; для новых стальных труб  $\Delta = 0,45 \text{ мм}$ . При защитных покрытиях внутренней поверхности новых труб (битумизация, покрытие лаками и т.п.) шероховатость имеет другие значения.

Для воды (температурой  $10^\circ\text{C}$ ), используя значения числа Рейнольдса  $Re_{\text{кв}}$  по формуле

$$Re_{\text{кв}} = \frac{22,3Cd}{\Delta},$$

где  $d$  – диаметр трубопровода, м и указанные значения  $\Delta$ , найдены значения  $v_{\text{кв}}$  при превышении которых наступает квадратичная область (табл. 1); для «нормальных» труб принято  $\Delta = 1,35 \text{ мм}$ .

Т а б л и ц а 1

Вид трубы	Скорость, $v_{\text{кв}}$ , м/с, при диаметре труб, мм								
	50	100	200	300	400	500	600	1000	1400
Новая стальная	2,8	3,2	3,5	3,7	3,8	3,9	4	4,2	4,4
Новая чугунная	2,5	2,8	3,1	3,3	3,4	3,5	3,6	3,8	4
«Нормальная» (бывшая в эксплуатации)	0,8	0,9	1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3

При турбулентном режиме движения отношение коэффициента Шези в переходной области  $C$  к коэффициенту Шези в квадратичной области  $C_{\text{кв}}$  обозначение  $\theta_1 = C / C_{\text{кв}}$ , согласно исследованиям Ф.А.Шевелева для каждого вида труб зависит только от средней скорости, если принять кинематический коэффициент вязкости жидкости  $\nu = \text{const}$ .

Исходя из того, что

$$C / C_{\text{KB}} = \sqrt{\lambda_{\text{KB}} / \lambda},$$

имеем

$$\lambda / \lambda_{\text{KB}} = 1 / \theta_1^2 = \theta_2$$

Значения коэффициентов  $\theta_1$  и  $\theta_2$  для новых стальных и чугунных труб, а также для «нормальных» труб приведены в справочной литературе.

Так как

$$K = \omega C \sqrt{R}, \text{ а } K_{\text{KB}} = \omega C_{\text{KB}} \sqrt{R}, \text{ то}$$

$$K = \theta_1 K_{\text{KB}},$$

где  $K_{\text{KB}}$  – расходная характеристика в квадратичной области сопротивления;

$K$  – расходная характеристика в любой, в том числе и в переходной, области.

Отсюда расход жидкости

$$Q = \theta_1 K_{\text{KB}} \sqrt{J}. \quad (10)$$

Из формулы (13.7) с учетом формулы (13.10) получим

$$H = \theta_2 Q^2 l / K_{\text{KB}}^2. \quad (11)$$

В квадратичной области сопротивление  $\theta_1 = \theta_2 = 1$ , в переходной области  $\theta_1 < 1$ , а  $\theta_2 > 1$ .

Трубопроводы, имеющие различные по длине диаметры, называются сложными. К сложным трубопроводам относятся также разомкнутые и замкнутые сети с устройством регулирующих резервуаров и без них.

Рассмотрим систему из последовательно соединенных длинных труб различных диаметров и длин. В общем случае материал труб может быть различным. Система соединяет два резервуара (рис. 3), при этом заданы расход  $Q$ , диаметры труб и длины участков.

По трубопроводу, составленному из последовательно соединенных труб, проходит не изменяющийся по длине транзитный расход  $Q$ . На каждом  $i$ -ом участке рассматриваемого трубопровода для пропуска расхода  $Q$  затрачивается часть суммарного напора  $H$ , равная

$$H_i = Q^2 l_i / K_i^2 = h_{\text{дл}i}$$

где  $i=1,2,3,\dots,n$  – номер участка трубопровода.

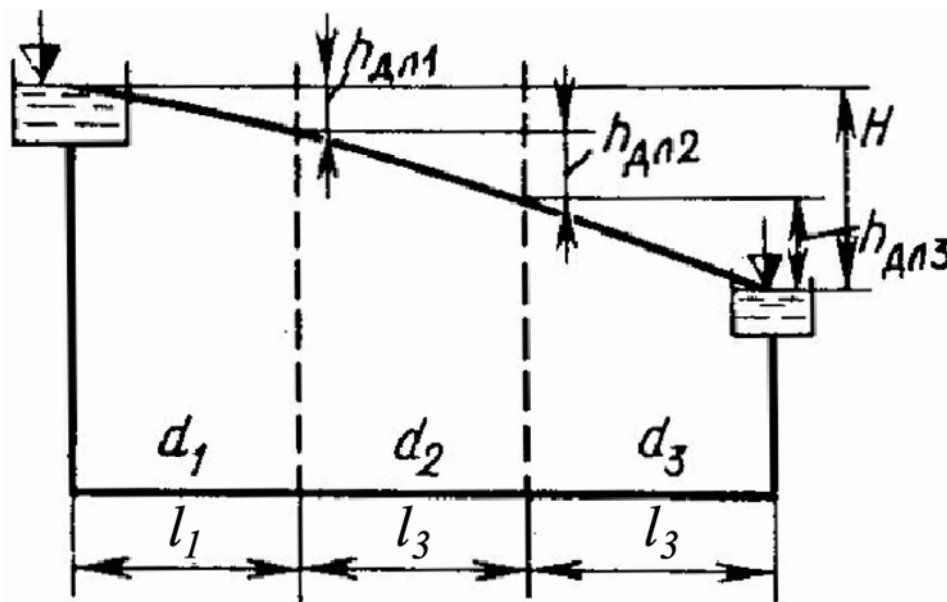


Рис. 3

Поскольку местными потерями пренебрегаем, напор  $H$  затрачивается на преодоление потерь напора по длине и будет равен сумме потерь напора на отдельных участках:

$$H = H_1 + H_2 + \dots H_n = \sum_{i=1}^{i=n} H_i. \quad (12)$$

Учитывая формулу (11), получаем при постоянном расходе  $Q$

$$H = Q^2 \sum_{i=1}^{i=n} \theta_{2i} l_i / K_{икв}^2, \quad (13)$$

или

$$H = Q^2 \sum_{i=1}^{i=n} A_i l_i.$$

где  $A_i$  – удельное сопротивление  $i$ -го участка области сопротивления.

При параллельном соединении длинных трубопроводов между точками  $M$  и  $N$  проходит несколько труб (рис.4).



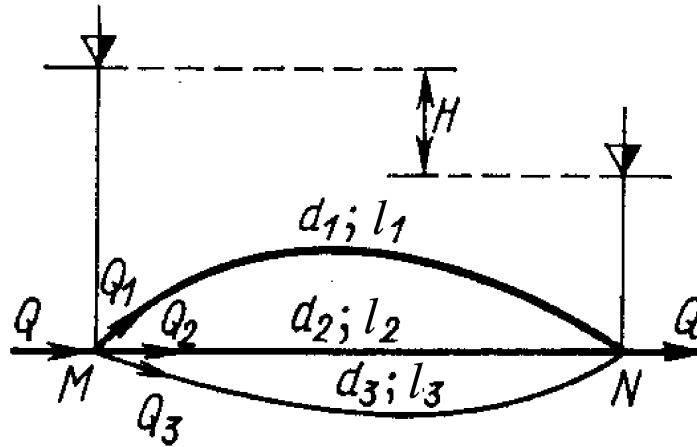


Рис. 4

Будем считать, что заданы расход  $Q$ , длины, диаметры, материал и расходные характеристики труб.

Разность пьезометрических напоров в начале и в конце труб составляет напор  $H$ , полностью затрачиваемый на преодоление сопротивлений. На каждом участке трубы движение происходит под действием одного и того же напора. Но так как длины участков различны, гидравлические уклоны на каждом участке будут разными

$$J_i = H / l_i,$$

где  $i$  – номер участка трубы.

Расход, проходящий по любому участку,

$$Q_i = K_i \sqrt{H / l_i}, \quad (14)$$

или

$$Q_i = \sqrt{\frac{H}{l_i A}}. \quad (15)$$

Для всех  $n$  участков имеем  $n$  уравнений для  $Q$ , например (14) или (15).

Сумма расходов на отдельных участках должна быть равна общему расходу, поступающему в систему параллельно соединенных трубопроводов в точке  $M$  и выходящему из системы в точке  $N$ :

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i. \quad (16)$$

Таким образом, имеем  $n+1$  уравнение:  $n$  уравнений вида (14) и уравнение (16).

В результате можно определить необходимый напор  $H$  и расход в каждой из параллельно соединенных линий.

Из формулы (14) и уравнения (16) найдем

$$Q = \sqrt{H} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{K_i}{\sqrt{l_i}} \quad (17)$$

или

$$H = Q^2 / \left( \sum_{i=1}^{i=n} \frac{K_i}{\sqrt{l_i}} \right)^2. \quad (18)$$

Распределение расходов между отдельными участками заранее не известно. Поэтому все расходы на участках (которые пока не известны) выражают через какой-либо один, например через  $Q_1$ . Тогда, используя формулу (14), получаем:

$$\frac{Q_i}{Q_1} = \frac{K_i}{K_1} \sqrt{\frac{l_1}{l_i}} \quad (19)$$

или

$$Q_i = Q_1 \frac{K_i}{K_1} \sqrt{\frac{l_1}{l_i}}. \quad (20)$$

Подставив формулу (20) в уравнение (16), найдем расход  $Q_i$ , а затем и остальные расходы.

Часто встречаются случаи, когда по длине трубопровода происходит раздача некоторой части расхода или всего расхода, причем отбор жидкости (воды) потребителями происходит в нескольких сечениях по длине трубопровода.

К таким трубопроводам относятся городские и сельские водопроводы, поливные трубопроводы, подающие воду в каждую борозду через отверстия, трубопроводы различных технических систем, в том числе внутрипочвенного и капельного орошения. Собирающие трубопроводы (дренажные коллекторы) работают в условиях увеличения расхода по длине.

Наиболее простая схема, применяемая при расчете таких трубопроводов – непрерывное изменение раздаваемого или поступающего расхода  $Q_p$  по длине. При такой схеме на каждой единице длины расход в трубопроводе изменяется (уменьшается или растет) в среднем на  $Q_p/l$ .

Рассмотрим трубопровод с непрерывным уменьшением расхода по пути, т.е. трубопровод с непрерывной раздачей расхода  $Q_p$ . Помимо расхода  $Q_p$ , линейно изменяющегося от  $Q_p$  в начале трубопровода до нуля в конце, в общем случае по такому трубопроводу может проходить без изменения еще транзитный расход  $Q_t$ . Тогда в начале трубопровода (рис..5) расход равен  $Q_t + Q_p$ , а в конце  $Q_t$ .

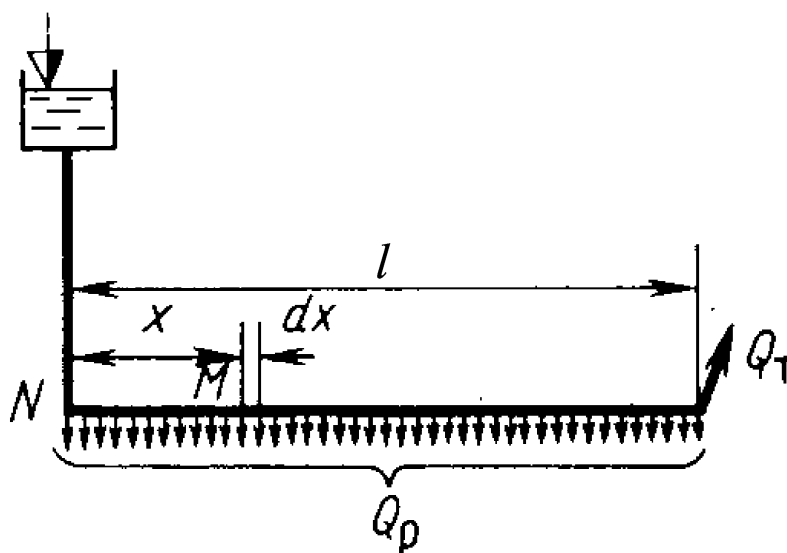


Рис. 5

Определим потери напора в трубопроводе с непрерывной раздачей расхода при некоторых упрощающих допущениях.

Выделим на произвольном расстоянии  $x$  от начала участка сечение  $M$ , расход в котором  $Q_M$  меньше расхода в начальном сечении на расход, уже распределенный по длине  $x$ , т.е. на участке  $NM$ :

$$Q_M = Q_T + Q_p - \frac{Q_p}{l}x$$

Условно считаем, что в данном случае в любом  $i$ -м сечении можно применить вытекающее из формулы Шези выражение для гидравлического уклона при равномерном движении

$$J = Q_i^2 / K_i^2.$$

В действительности при непрерывной раздаче скорость по длине не постоянна, а уменьшается, т.е. условия равномерного движения нарушены. В пределах выделенного элемента  $dx$ , примыкающего к сечению  $M$ , гидравлический уклон

$$J_M = Q_M^2 / K^2 = \left( Q_T + Q_p - \frac{Q_p}{l}x \right)^2 / K^2.$$

На длине  $dx$  уменьшение напора

$$dH = Jdx = \left[ \frac{(Q_T + Q_p)^2}{K^2} - \frac{2Q_p}{lK^2}(Q_T + Q_p)x + \frac{Q_p^2}{l^2K^2}x^2 \right] dx.$$

После интегрирования от 0 до  $l$  и упрощения получим

$$H = \frac{1}{K^2} \left( Q_T^2 + Q_T Q_p + \frac{1}{3} Q_p^2 \right) \quad (21)$$

Ориентировочно можно принять

$$(Q_T^2 + Q_T Q_p + Q_p^2 / 3) \approx (Q_T + 0,55 Q_p)^2.$$

Введем понятие «расчетный расход»:

$$Q_{\text{расч}} = Q_T + 0,55 Q_p.$$

Тогда вместо формулы (13.21) запишем

$$H = Q_{\text{расч}}^2 l / K^2 = \theta_2 Q_{\text{расч}}^2 / K_{\text{кв}}. \quad (22)$$

Если  $Q_p = 0$ , то  $Q_{\text{расч}} = Q_T$ ; если  $Q_T = 0$ , то  $Q_{\text{расч}} = 0,55 Q_p$ ; если  $Q_T > 0$  и  $Q_p > 0$ , то  $Q_{\text{расч}} = Q_T + 0,55 Q_p$ .

Если транзитный расход отсутствует, то

$$H = \frac{1}{3} \frac{Q_p^2 l}{K^2}. \quad (23)$$

Таким образом, при непрерывной раздаче расхода требуется напора в 3 раза меньше, чем при транзите такого же расхода (см. формулу (7)).

#### Контрольные вопросы

1. Что такое простой водопровод? В чем различие между гидравлически длинным и коротким трубопроводами?
2. Какие основные задачи решают при расчетах установившегося напорного движения в простых трубопроводах?
3. На основе каких уравнений решаются указанные основные задачи?
4. В каком виде записывается формула Шези для расхода при расчетах гидравлически длинного трубопровода при установившемся напорном движении?
5. Как выражается напор через удельное сопротивление трубы?
6. Почему в формулы для расхода и для напора вводят поправочные коэффициенты? Как определить, нужно ли применять указанные коэффициенты?
7. Как зависит изменение скорости, при котором наступает квадратичная область сопротивления, от изменения диаметра трубопровода при остальных неизменных параметрах?
8. В чем заключаются гидравлические особенности работы трубопроводов из последовательно и из параллельно соединенных труб?
9. Какие допущения сделаны при выводе формулы для потерь напора в трубопроводе с непрерывным изменением расхода по длине?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агроскин И.И. Гидравлика [Текст]/ И.И.Агроскин, Г.Т. Дмитриев, Ф.И.Пикалов.–М.:Энергия, 1964 – 352 с.
2. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика [Текст]/ А.Д.Альтшуль, П.Г.Киселев.–М.: Стройиздат, 1975 – 323 с.
3. Емцев Б.Т.Техническая гидромеханика [Текст]/ Б.Т.Емцев.–М.: Машиностроение, 1987.- 440 с.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст]/ И.Е.Идельчик.–М.:Машиностроение, 1975. – 384 с.
5. Киселев П.Г. Гидравлика. Основы механики жидкости [Текст] / П.Г.Киселев.–М.: Энергия, 1980. – 360 с.
6. Курганов А.М. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации [Текст]/ А.М.Курганов, Н.Ф.Федоров. – Л.:Стройиздат (Ленинградское отделение), 1973.- 408 с.
7. Шевелев Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. Справочное пособие [Текст]/ Ф.А.Шевелев, А.Ф. Шевелев. – М.: ООО «БАСТЕТ», 2008. – 352 с.
8. Штеренлихт Д.В. Гидравлика [Текст]/ Д.В. Штеренлихт. – М.: КолосС, 2008. – 656 с.

Учебное издание

Гришин Борис Михайлович  
Бикунова Марина Викторовна

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ  
НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Методические указания  
для самостоятельной работы

Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова

В авторской редакции  
Верстка Т.Ю. Симутина

---

Подписано в печать 8..07.15. Формат 60х84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл.печ.л. 0,81. Уч.-изд.л. 0,87. Тираж 80 экз.  
Заказ № 281.

---

Издательство ПГУАС.  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28