

# Расчёт гидравлических параметров водопропускных труб и его реализация в программных продуктах

DOI: 10.17273/CADGIS.2019.2.6

Савельева Т.Н., системный аналитик ООО «ИндорСофт» (г. Томск)

*В статье рассмотрены основные гидравлические характеристики водопропускных труб, способ их расчёта в заданных гидрологических условиях, а также возможность оценки водопропускной способности и подбора соответствующей конструкции искусственных сооружений данного типа в программах IndorCulvert и Топоматик Robur-Искусственные сооружения.*





## Введение

В данной статье рассмотрим режимы работы и гидравлические параметры водопропускных труб, расчёт их пропускной способности, а также возможность оценки режима протекания и основных гидравлических характеристик труб в современных программных продуктах, представленных на российском рынке программного обеспечения [1].

Водопропускные трубы являются одним из наиболее массовых видов искусственных сооружений на дорогах разного назначения. В настоящее время их число на железных дорогах в районах с различным рельефом местности составляет 0,3–0,9 трубы, а на автомобильных — примерно 1,4 трубы на 1 км трассы [2]. Перспективы развития строительной индустрии требуют совершенствования конструктивно-технологических параметров возведения таких сооружений при снижении стоимости конструкций и работ, связанных с ними. В том числе нужен более точный подбор конструкции для гидрологических условий местности. Это приводит к необходимости выполнения оценки пропускной способности труб на этапе их проектирования.

Пропускная способность дорожных труб зависит главным образом от напора перед сооружением, размера отверстий и конструкции входных оголовков. Расчёт пропускной способности выполняют по уравнениям гидравлики, соответствующим режиму протекания потока через сооружение [3].

## Режимы работы водопропускной трубы

В зависимости от характера затопления оголовков режимы работы водопропускных труб разделяют на безнапорный, полунанпорный и напорный.

При безнапорном режиме входной оголовок не затоплен и на всём протяжении трубы поток имеет свободную поверхность (рис. 1). Водопропускная труба при безнапорном режиме работает аналогично водосливу с широким порогом [2].

Верхней границей безнапорного режима является напор ( $H$ ), при котором происходит затопление входного оголовка. Приблизительно можно принимать, что затопление происходит при  $H/h = 1,1$  (для оголовков воротникового типа это значение составляет 1,2, для оголовков коридорного типа — 1,3).

Полунанпорный режим сменяет безнапорный при затоплении входного оголовка (рис. 2). При полунанпорном режиме водопропускная труба работает аналогично случаю истечения потока из-под щита [2].

Верхней границей полунанпорного режима является расход (напор), при котором происходит «зарядка» трубы, т.е. смена полунанпорного режима напорным, при котором труба на всей длине начинает работать полным сечением (рис. 3).

При полунанпорном и напорном гидравлических режимах над затопленным входным оголовком самопроизвольно формируются вихревые воронки (одна или несколько одно-

временно), через вихревые шнуры которых в трубу поступает воздух.

Поступающий в трубу с «несамозряжающимся» входным оголовком воздух через вихревую воронку может привести к срыву переходного режима и формированию полунанпорного режима. Пропускная способность трубы при этом снижается, напор  $H$  перед ней увеличивается (при постоянной величине расхода воды  $Q$ ), и если при этом произойдет «зарядка» трубы, то сформируется крайне неблагоприятная форма переходного режима с периодической «зарядкой» и «разрядкой» водопропускной трубы.

Такой переходный режим работы водопропускной трубы считается недопустимым. Поэтому гладкостенные водопропускные трубы в настоящее время проектируются на работу в безнапорном режиме, хотя при работе в полунанпорном и напорном режимах их пропускная способность существенно возрастает.

## Основные гидравлические характеристики трубы и особенности их расчёта

В качестве исходных данных для гидравлических расчётов используются следующие данные, получаемые в процессе гидрологических изысканий:

- расчётный расход с вероятностью превышения 1%;
- объём стока;
- топографический план бассейна водосбора;
- продольный профиль автомобильной дороги;

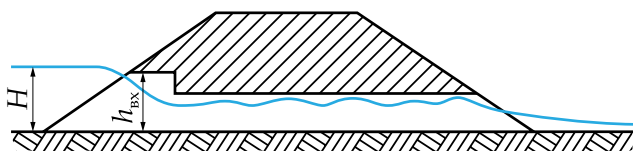


Рис. 1. Работа водопропускной трубы в безнапорном режиме

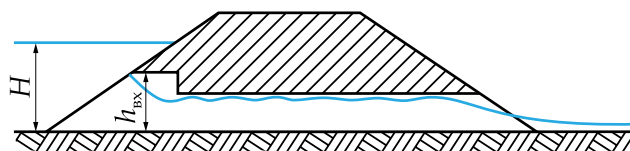


Рис. 2. Работа водопропускной трубы в полунанпорном режиме

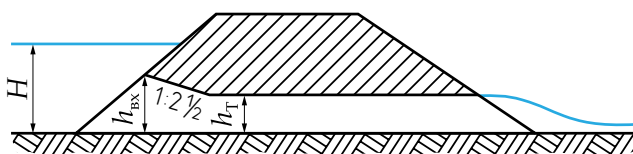


Рис. 3. Работа водопропускной трубы в напорном режиме

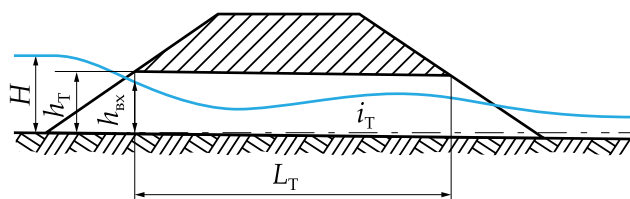


Рис. 4. Водопропускная труба и её гидравлические параметры:  $h_T$  — высота трубы;  $H$  — подпор перед трубой;  $h_{вх}$  — глубина воды на входе;  $i_T$  — уклон трубы

- поперечные профили автодороги по линиям водоразделов рассматриваемого бассейна;
- информация о наличии существующих водопропускных сооружений на рассматриваемом водотоке;
- информация о расположенных в непосредственной близости существующих автодорог и железнодорожных линий.

Водопропускные сооружения рассчитываются на пропуск максимальных расчётных расходов определённой вероятности превышения, которая зависит от категории дороги [4]. По результатам гидравлических расчётов должны быть установлены следующие параметры, определяющие основные размеры сооружений:

- наибольшая глубина перед сооружением, определяющая высоту дорожной насыпи;
- глубина воды на входе и в сооружении, определяющая режим протекания и заполнения водовода;
- глубина воды и скорость на выходе из сооружения, по которым назначаются размеры и тип укреплений на выходе.

Порядок расчёта основных характеристик

Согласно [5] рекомендован следующий алгоритм расчёта водопропускной способности трубы.

1. Расчётная зависимость расхода, поступающего в сооружение, от подпора перед трубой представлена следующим образом:

$$Q = Q_{\text{пр}} \left( 1 - \frac{k_0}{i_n i_c W} H^3 \right), \quad (1)$$

где  $Q_{\text{пр}}$  — расход воды с соответствующей вероятностью превышения,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$W$  — объём стока для гидрографа с наибольшим расходом,  $\text{м}^3$ ;

$i_n$  — уклон лога перед сооружением, %;

$i_c$  — уклон склонов перед сооружением, %;

$k_0$  — коэффициент, зависящий от очертания пруда в плане, продольного и поперечного профиля по логу, определяется по приложению А [5].

Строится зависимость  $Q = f(H)$ .

2. Предварительно назначается отверстие трубы по действующему типовому проекту с учётом требований [СП] о минимальном отверстии трубы.

3. Проверяется условие безнапорного режима в зависимости от типа входного оголовка:

- для всех типов оголовков, кроме воротниковых и коридорных, затопление происходит при  $H/h_T = 1,1$ ;
- для оголовков воротникового типа затопление происходит при  $H/h_T = 1,2$ ;
- для оголовков коридорного типа затопление происходит при  $H/h_T = 1,3$ .

4. При невыполнении условия безнапорного протекания диаметр отверстия трубы увеличивается.

5. Определяется тип трубы в гидравлическом отношении. Для этого вычисляется критический уклон трубы по формуле:

$$i_{\text{кр}} = \frac{Q^2}{\omega_k^2 C_k^2 R_k} = \frac{g \chi_k}{\alpha C_k^2 b_k}, \quad (2)$$

где  $Q$  — расчётный расход потока,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\omega_k$  — площадь живого сечения потока ( $\text{м}^2$ ) при критической глубине  $h_k$ , м;

$b_k$  — ширина потока поверху, м;

$R_k$  — гидравлический радиус сечения потока, м;

$g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\alpha$  — коэффициент Кориолиса, принимаемый равным 1,1;

$\chi_k$  — смоченный периметр сечения потока, м;

$C_k$  — коэффициент Шеши, определяемый по формуле Павловского:

$$C_k = \frac{1}{n} R_k^y, \quad (3)$$

где  $n$  — коэффициент шероховатости, равный для бетонной поверхности 0,015;

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

В случае, если уклон трубы больше или равен критическому значению уклона  $i_T \geq i_{\text{кр}}$ , то труба любой длины является «короткой» в гидравлическом отношении.

Во всех остальных случаях труба считается «длинной» в гидравлическом отношении.

6. Далее определяется подпор перед трубой.

Для гидравлически «короткой» трубы он вычисляется по формуле:

$$H_{\text{кор}} = \left( \frac{Q}{mb_k \sqrt{2g}} \right)^{3/5}, \quad (5)$$

где  $m$  — коэффициент расхода при совершенном сжатии потока на входе, принимаемый по таблице 2 Приложения А;

$b_k$  — средняя ширина потока в сечении с критической глубиной; для прямоугольных труб равна ширине трубы, для круглых определяется по графику на рисунке 5.

Перед гидравлически «длинной» трубой подпор определяется по формуле:

$$H_{\text{дл}} = h_T \left[ \frac{H_{\text{кор}}}{h_T} + 0,005 \left( \frac{l_T}{h_T} - 20 \right) \left( \frac{H_{\text{кор}}}{h_T} \right) \right], \quad (6)$$

где  $H_{\text{кор}}$  — подпор перед аналогичной «короткой» трубой, м.

7. По полученному значению подпора проверяется условие безнапорного протекания в соответствии с п.3.

8. Выполняются также следующие проверки уровня подпора:

- возвышение бровки земляного полотна по продольному профилю трассы в границах бассейна водосбора: не менее чем на 0,5 м;
- отсутствие перелива воды в соседний бассейн — проверяется по поперечному профилю земляного полотна автодороги в местах водоразделов;
- при наличии вблизи мостов и труб инженерных сооружений, зданий и сельскохозяйственных угодий необходимо проверить их безопасность от подтопления

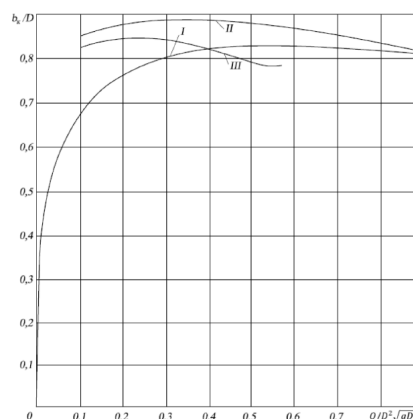


Рис. 5. График для определения средней ширины потока в сечении с критической глубиной в трубах с непрямоугольным сечением (I — для круглого сечения; II — для лоткового, III — для оvoidального)

вследствие подпора воды перед сооружением;

- при наличии в непосредственной близости автомобильной или железной дороги с водопропускным сооружением, расположенном на том же водотоке, проверить взаимное влияние уровней подпертых вод на режим работы соседнего сооружения.

В случае невыполнения проверок производится увеличение отверстия трубы и расчет повторяется.

#### 9. Определяется глубина и скорость воды на выходе из трубы.

Глубина потока на выходе определяется из выражения:

$$\frac{h_{\text{вых}}}{h_k} = A_k f(i_T), \quad (7)$$

где  $h_k$  — критическая глубина в трубе, м;  
 $A_k$  — коэффициент, определяемый исходя из формы сечения трубы по приложению А ОДМ. Критическая глубина вычисляется из выражения:

$$\frac{\alpha Q^2}{g \omega_k^3} B_k = 1, \quad (8)$$

где  $\alpha$  — коэффициент Кориолиса, принимаемый равным 1,1;  
 $Q$  — расход, м<sup>3</sup>/с;  
 $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $\omega_k$  — площадь живого сечения при критической глубине, м<sup>2</sup>;  
 $B_k$  — ширина живого сечения по свободной поверхности при критической глубине, м.  
 Скорость потока на выходе из трубы определяется по формуле:

$$v_{\text{вых}} = \frac{Q}{\omega_{\text{вых}}}, \quad (9)$$

где  $Q$  — расчётный расход потока, м<sup>3</sup>/с;  
 $\omega_{\text{вых}}$  — площадь живого сечения потока (м<sup>2</sup>) на выходе из трубы.

Таким образом, исходя из рассчитанных значений подбирается минимальный диаметр трубы, при котором сооружение будет исправно работать в заданных гидрологических условиях.

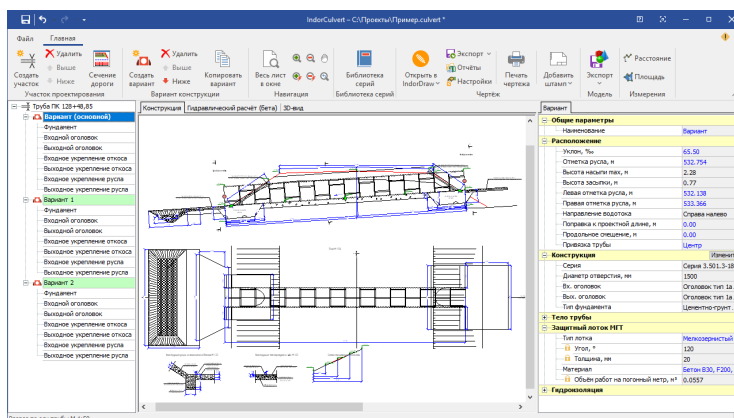


Рис. 6. Главное окно системы IndorCulvert

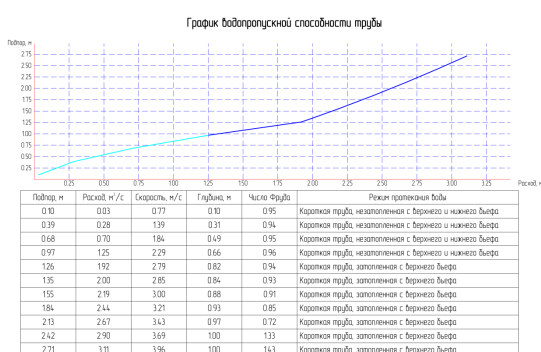


Рис. 7. График водопропускной способности трубы в системе IndorCulvert

## Реализация расчёта гидравлических параметров в программных продуктах

### IndorCulvert

Система проектирования водопропускных труб IndorCulvert («ИндорСофт», г. Томск) представлена на рынке программного обеспечения с 2015 года [6] (рис. 6).

В программе реализована поддержка большого количества типовых альбомов водопропускных труб, что позволяет создавать несколько вариантов конструкции трубы, по

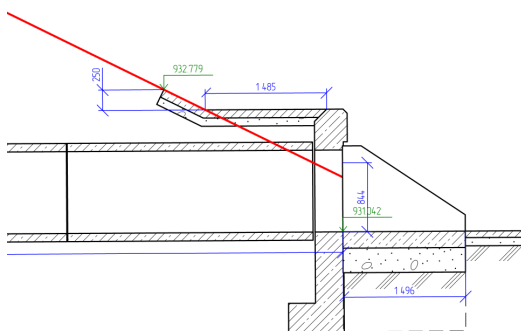


Рис. 8. Отображение уровня воды на входе трубы на чертеже в системе IndorCulvert

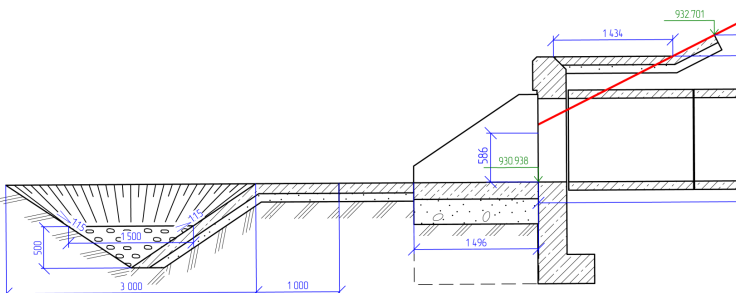


Рис. 9. Отображение уровня воды на выходе трубы на чертеже в системе IndorCulvert

## Расчётные данные

Параметры трубы	
Форма сечения звеньев	Круглая труба
Диаметр отверстия, м	1
Длина тела трубы, м	23.30
Уклон лотка, ‰	0.00
Материал звеньев	Гладкий (бетон)
Тип оголовка на входе	Портальная стенка с открываками
Тип оголовка на выходе	Портальная стенка с открываками
Исходные данные	
Расчетный расход, м³/с	2.00
Скорость воды на входе, м/с	0.00
Глубина воды на входе, м	1.35
Результаты расчета	
Режим протекания воды	Короткая труба, затопленная с верхнего бьефа
Ширина потока, м	0.74
Площадь потока, м²	2.31
Число Фруда	0.93
Критический уклон, ‰	9.33
Критическая глубина, м	0.84
Глубина воды на выходе, м	0.84
Скорость воды на выходе, м/с	2.85

Рис. 10. Таблица исходных и рассчитанных параметров трубы в системе IndorCulvert

каждому из которых автоматически формируется чертёж и строится трёхмерная модель конструкции. Расчёт укладки звеньев может быть произведён как автоматически, так и вручную. Интерактивное создание полноценного чертежа по всем вариантам делает выбор оптимальной конструкции трубы удобным и наглядным.

В 2018 году в систему проектирования водопропускных труб IndorCulvert в режиме бета-тестирования был введён расчёт водопропускной способности труб. Он выполняется следующим образом: сначала задаётся конструкция трубы, затем для неё ведётся проверка условий протекания воды.

В проекте задаётся расход воды, на основе которого вычисляется режим протекания, а также

строится график водопропускной способности трубы. С помощью него можно определить величину расхода, при которой начнётся подтопление верхнего бьефа и труба войдёт в полунапорный режим, что для гладкостенных железобетонных труб является нежелательным.

На чертеже представлены вычисленные в ходе расчёта глубины воды на входе и выходе трубы (рис. 8, 9).

Основные гидравлические параметры трубы также рассчитываются и приводятся рядом с чертежом в виде таблицы (рис. 10).

### Топоматик Robur-Искусственные сооружения

Для расчёта водопропускной способности сооружения в системе Топоматик Robur-Искусственные сооружения (НПФ «Топоматик», г. Санкт-Петербург) также сначала формируется конструкция трубы, указывается её расход и режим работы. В рабочей области обозначается место предполагаемой укладки трубы на поперечном сечении дороги (рис. 11).

На рисунке 12 представлены карточка параметров конструкции трубы и карточка объекта (участка проектирования). В случае, если для указанных параметров конструкции желаемый режим протекания является невозможным, система выдаст предупреждение об этом.

Далее производится расчёт раскладки трубы и оценка её конструктивных параметров (рис. 13).

Затем нажатием кнопки «Создать чертёж» можно сформировать и просмотреть чертёж полученной конструкции (рис. 14).

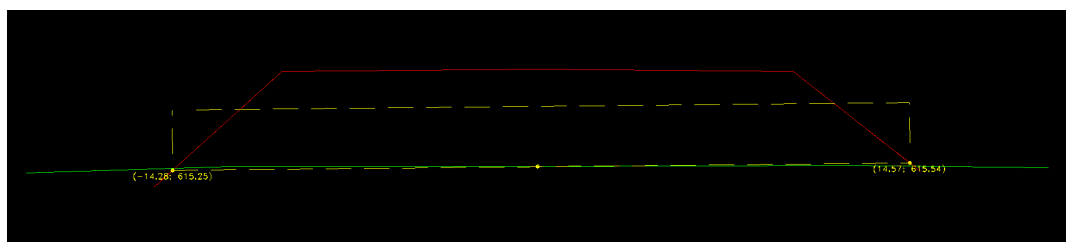


Рис. 11. Место предполагаемой укладки трубы в системе Топоматик Robur-Искусственные сооружения

Свойства трубы

Название и комментарий: Основные параметры: Фундамент, отверстия и оголовки: Укрепление откосов и русла:

Тип проектирования: Новое строительство

Тип дороги: Автомобильная

Отметка русла, м: 615.39

Высота насыпи (расчетная), м: 3.81

Уклон, ‰: 10

Коэффициент строк. подъема: 80

Удлинение трубы:

Слева: 0

Справа: 0

Положение существующей трубы (реконструкция):

Слева: X: -14.788 Y: 615.365

Справа: X: 14.723 Y: 615.416

OK Отмена

Свойства объекта

Название и комментарий: Основные параметры: Поперечник:

Расположение:

Пикет: 3+0.00

Угол, град: 90

Параметры водотока:

Глубина промерзания, м: 1

Расход, куб. м/с: 1

Режим протекания: Безнапорный

Параметры грунта:

Тип грунта: песок, галечниковый и гравелистый грунт

Связность: Связный

OK Отмена

Рис. 12. Исходные данные для формирования конструкции трубы

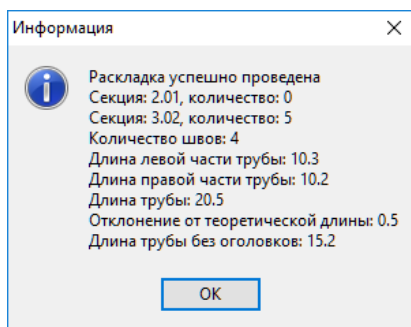


Рис. 13. Автоматическая раскладка трубы в Topomatik Robur-Искусственные сооружения

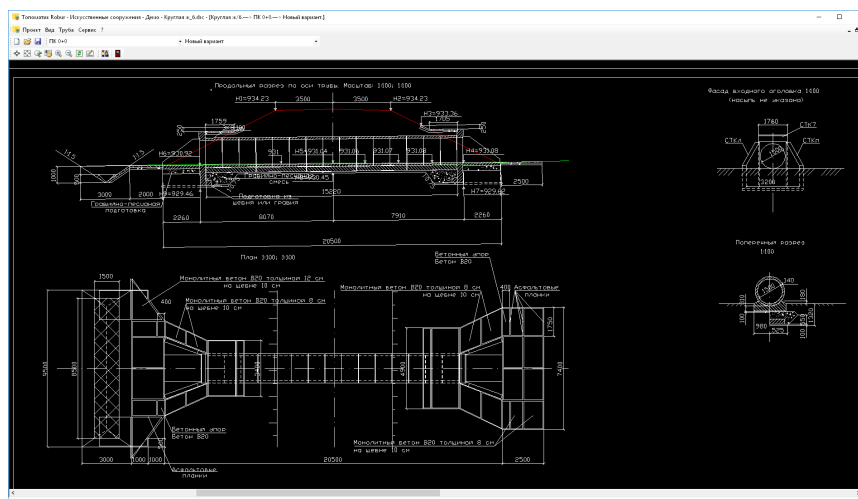
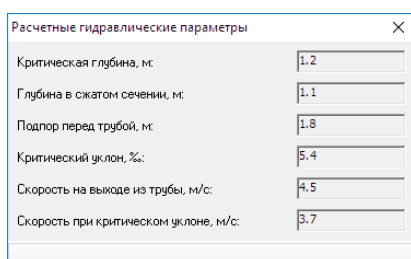


Рис. 14. Чертёж трубы в Topomatik Robur-Искусственные сооружения

Рис. 15. Рассчитанные в программе Topomatik Robur-Искусственные сооружения гидравлические параметры

На основе имеющихся данных об участке проектирования и предварительной конструкции трубы рассчитываются гидравлические характеристики сооружения. Полученные значения вводятся в отдельном окне (рис. 15).

## Заключение

Расчёт водопропускной способности трубы на этапе проектирования позволяет наиболее точно подобрать оптимальные параметры конструкции трубы. Использование автоматизированного расчёта гидравлических характеристик для нескольких вариантов конструкций в одном проекте помогает значительно ускорить и упорядочить процесс выбора оптимальной конструкции для определённого участка, что в итоге позволяет экономить трудовые и денежные ресурсы. [\[1\]](#)

### Литература:

1. Федотов Н.Г., Кривых И.В. Обзор программных продуктов для проектирования водопропускных труб // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2(5). С. 86–93. DOI: 10.17273/CADGIS.2015.2.13
2. Алтунин В.И., Суэтина Т.А., Черных О.Н. Гидравлические расчёты водопропускных труб на автомобильных дорогах. Учебное пособие. М.: МАДИ, 2016, 92 с.
3. Пособие по гидравлическим расчётам малых водопропускных сооружений. М.: Транспорт, 1992, 408 с.
4. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. М.: ОАО «ЦПП», 2011. 345 с.

5. ОДМ 218.2.082–2017. Методические рекомендации по проведению гидравлических расчётов малых ИССО на автомобильных дорогах. М., 2017. 45 с.
6. Райкова Л.С., Снежко И.В., Шаймарданов М.Ш. IndorCulvert как надёжный инструмент для проектирования водопропускных труб // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2016. № 1(6). С. 34–36. DOI: 10.17273/CADGIS.2016.1.6