



*А.Г. Гудков, С.В. Колобова,  
М.В. Павлов, Д.Ф. Карнов*  
Вологодский государственный университет

## РАСЧЕТ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С НЕРАВНОМЕРНЫМ ТЕЧЕНИЕМ ВОДЫ

Уточнена методика определения пропускной способности безнапорных канализационных трубопроводов при неравномерном течении воды. Приведены расчетные графики в безразмерных координатах. Предложена аппроксимирующая степенная формула для упрощения инженерных расчетов, определены коэффициенты регрессии в формуле.

Коллектор, канализация, гидравлический расчет, неравномерное течение.

Наружные водоотводящие сети для отвода бытовых, производственных и дождевых сточных вод рассчитывают обычно из условия безнапорного равномерного движения, пренебрегая возникающим на отдельных участках сети неравномерным движением, хотя это и связано с заиливанием и другими нежелательными последствиями [1]. Такие факторы, как неровности дна, изменения его уклона, формы и размеров сечения канала или трубы, расходов на некоторых участках, нарушают процесс равномерного движения и обуславливают возникновение неравномерности. Медленно изменяющееся неравномерное течение возникает в таких случаях:

- в коллекторе при истечении жидкости из него в водоем или резервуар, уровень воды в которых ниже (кривая спада) или выше (кривая подпора) уровня сточной жидкости в коллекторе;
- перед ливнеспусками и разделительными камерами;
- перед насосной станцией и т.д.

На конечных участках сети условиями неравномерного движения обычно нельзя пренебрегать. При расчетном режиме работы насосной станции на концевом участке коллектора (т.е. перед приемным резервуаром) устанавливается кривая спада. Как отмечается в [1], важен вопрос и об использовании свободной емкости подводящих к насосным станциям коллекторов путем повышения уровня сточных вод в коллекторе от кривой спада до свободной поверхности, отвечающей равномерному их движению с постоянной расчетной скоростью.

В настоящее время водоотводящие сети на неравномерное движение, как правило, не рассчитывают, что обусловлено в первую очередь большой трудоемкостью расчетов. Но необходимость в таких расчетах, как указано выше, имеется. Следует отметить, что построение кривой свободной поверхности в коллекторах особого практического значения не имеет.

Целью настоящей работы является уточнение методики расчета пропускной способности канализационных трубопроводов при неравномерном течении, составление зависимостей, графиков и таблиц для практического использования в проектно-конструкторских целях.

**Решение уравнения неравномерного движения в трубопроводах.** Рассмотрим случай присоединения коллектора круглого сечения к канализационной насосной станции (КНС), при котором происходит свободный излив сточной воды в приемный резервуар.

Исходными данными к математическому моделированию движения потока являются известный расход жидкости  $Q$ , диаметр  $D$  и уклон  $i_0$  трубопровода, а также длина участка коллектора перед КНС. Для труб круглого сечения, которые представляют собой цилиндрические каналы замкнутого профиля, необходимые к расчету формулы площади поперечного сечения  $\omega$ , смоченного периметра  $\chi$ , ширины потока  $B$  имеют вид:

$$\omega = D^2(\beta - \sin \beta)/8; \chi = D \cdot \beta/2; B = D \cdot \sin(\beta/2). \quad (1)$$

$$\beta = 2 \arccos(1 - 2a), \quad (2)$$

где  $a$  – степень наполнения коллектора, равная  $h/D$ ;  $h$  – глубина жидкости в коллекторе;  $\beta$  – угол сегмента смоченного периметра.

Для определения значения модуля расхода воспользуемся формулой Шези:

$$K = \omega C \sqrt{R}, \quad (3)$$

где  $C$  – коэффициент Шези;  $R$  – гидравлический радиус, равный отношению  $\omega/\chi$ .

Если рассматривать только геометрические характеристики круглого сечения, то гидравлический радиус можно определять так:

$$R = \frac{D}{4} \cdot \left(1 - \frac{\sin \beta}{\beta}\right). \quad (4)$$

Введем новые безразмерные переменные:

$$K^* = K/K_{\Pi}; Q^* = Q/Q_{\Pi}, \quad (5)$$

где  $Q_{\Pi}$  – расход при полном наполнении коллектора;  $K_{\Pi}$  – модуль расхода при полном наполнении, равный

$$K_{\Pi} = \frac{1}{8} \pi D^{5/2} C_{\Pi}, \quad (6)$$

здесь  $C_{\Pi}$  – коэффициент Шези при полном наполнении.

Принимая, что

$$i_0 = Q_{\Pi}^2 / K_{\Pi}^2, \quad (7)$$

дифференциальное уравнение установившегося течения для призматических каналов или трубопроводов с прямым уклоном дна можно представить в следующем виде:

$$i_0 \frac{dl}{D} = \frac{K^{*2} \left( 1 - \alpha \frac{Q^2 B}{g \omega^3} \right)}{K^{*2} - Q^{*2}} da, \quad (8)$$

где  $l$  – расстояние между двумя сечениями коллектора;  $\alpha$  – корректив кинетической энергии.

Ранее численным интегрированием уравнения (8) в [2, 3], с использованием формулы Н.Н. Павловского для коэффициента Шези были получены номограммы и расчетные таблицы. В результате обоснована возможность увеличения пропускной способности трубопровода по сравнению с расходом при равномерном движении, при свободном изливе или перепаде в конце.

Обозначим безразмерный симплекс геометрического подобия:

$$\Gamma_0 = i_0 l / D. \quad (9)$$

Тогда искомая функциональная зависимость в безразмерном виде будет следующей:

$$\Gamma_0 = f(Q^*, a_k), \quad (10)$$

где  $a_k$  – наполнение трубопровода в конце участка.

При уточнении пропускной способности трубопровода были приняты следующие допущения:

- для коэффициента Шези вместо формулы Н.Н. Павловского использована обобщенная формула А.Д. Альтшуля в степенной форме [4] как универсальная в разных областях гидравлического сопротивления:

$$C = 25 \left( \frac{R}{(80n)^6 + \frac{0,025}{\sqrt{Ri_f}}} \right)^{1/6}, \quad (11)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости (0,013–0,014);  $i_f$  – уклон трения;

- гидравлический радиус  $R$  определяется не по формальным параметрам для круглого сечения (4), а на основе эмпирических зависимостей, рассмотренных ниже;

- скорость течения также рассчитывается не по формуле Шези, а на основе эмпирических зависимостей.

#### Зависимости для скорости, гидравлического радиуса и расходов от наполнения коллектора.

Согласно экспериментальным исследованиям [1, 2] при наполнениях трубопроводов больше 0,6 весь поток можно рассматривать состоящим из двух частей: первая часть – до половины трубы, вторая – в объеме между двумя стенкам, со свободной поверхностью и горизонтальной плоскостью по оси трубы. Распределение скоростей в обеих частях устанавливается как в полностью заполненном трубопроводе, средняя скорость равна скорости в полностью заполненном трубопроводе. В этом случае гидравлический радиус не зависит от степени наполнения.

На графике (рис. 1) приведены предлагаемые в [3] относительные величины скорости  $v/v_{\Pi}$ , расхода  $Q/Q_{\Pi}$  и гидравлического радиуса  $R/R_{\Pi}$  от степени наполнения трубопровода  $a = h/d$ . Здесь  $v_{\Pi}$ ,  $R_{\Pi}$  – соответственно скорость течения и гидравлический радиус при полном наполнении трубы.

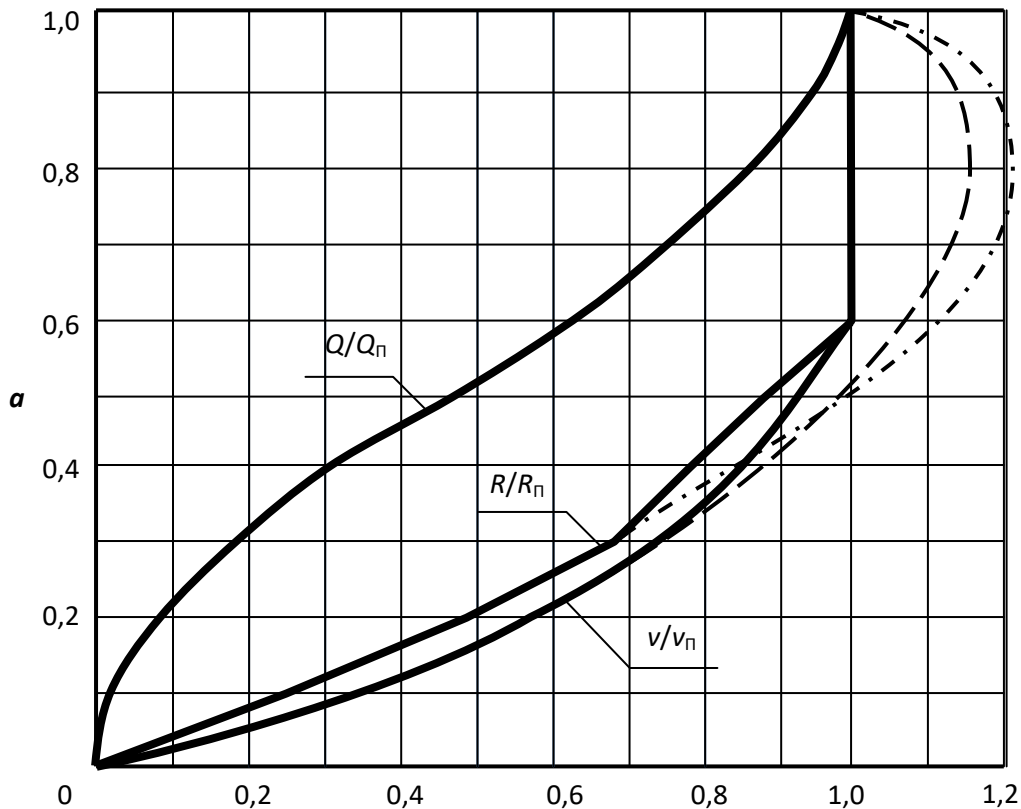


Рис. 1. Экспериментальные зависимости относительной скорости, гидравлического радиуса и пропускной способности трубопровода при безнапорном течении

Пунктиром на рисунке 1 обозначены зависимости  $R/R_{\Pi}$  по формуле (4) и  $v/v_{\Pi}$  по формуле Шези. При полном наполнении расход  $Q_{\Pi}$  можно принимать как для напорного течения при заданном уклоне, что позволяет использовать универсальные методы моделирования и расчета напорных и безнапорных трубопроводов.

**Расчеты и аппроксимация зависимости пропускной способности трубопровода при неравномерном течении.** Для дальнейших расчетов были использованы данные графика на рисунке 1 по гидравлическому радиусу и скорости в кубической сплайн-интерполяции. Численный эксперимент на основе формул (1)–(8), (11) был проведен с помощью одной из компьютерных программ систем компьютерной алгебры.

В итоге по уравнению (8) были получены графики при различных соотношениях  $Q^* = Q/Q_{\Pi}$  (представленные на рис. 2), а также таблицы для определения пропускной способности трубопроводов диаметрами 250...4000 мм, одна из которых представлена ниже (табл. 1).

Кроме того, были изучены возможности вывода аппроксимирующей зависимости для упрощения расчета пропускной способности коллектора. Критерием подбора аппроксимирующего выражения было достижение точности совпадения не менее чем на 90–95 % значений, рассчитанных по искомой формуле и полученных численным интегрированием уравнения (8). Кроме того, учитывалось удобство получаемой итоговой формулы для проведения инженерных расчетов.

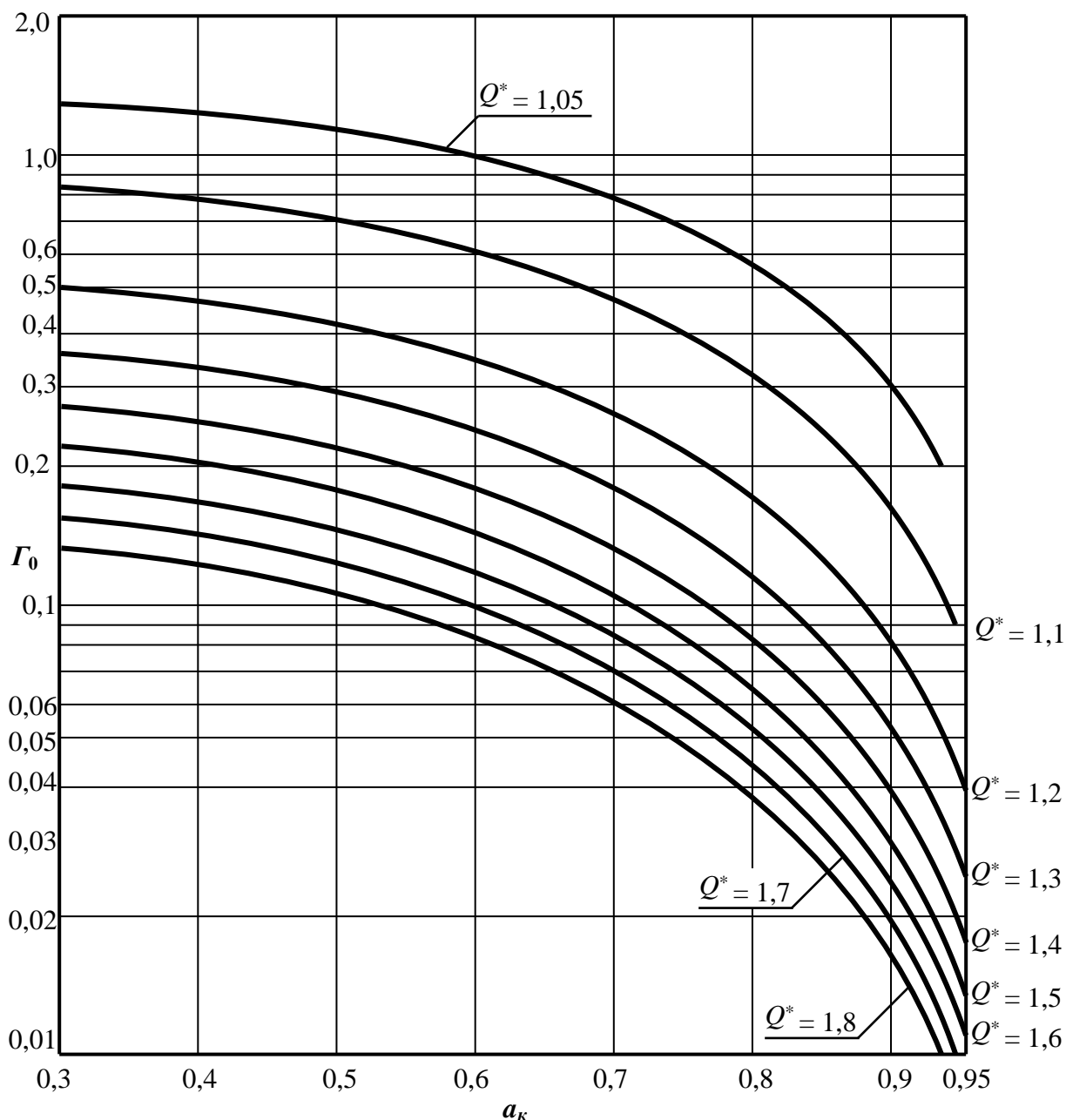


Рис. 2. Расчетные графики для определения пропускной способности трубопровода при полном наполнении и свободном изливе в резервуар

Таблица 1

**Пропускная способность трубопровода  $Q$  при свободном изливе в конце участка длиной  $L$  для различных внутренних диаметров  $D$**

$D=500$ мм		Уклон $i$ , тысячные											
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	15		
$Q_{полн}$ , л/с →		154,3	189,1	218,5	244,4	267,7	289,2	309,3	328,1	345,8	423,7		
$a_k^*$	$Q$ , л/с	Длина участка $L$ , м											
0,95	<b>541</b>	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1		
0,9	<b>437,8</b>	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5	2,9	14,2		
0,85	<b>374,9</b>	2,9	3,3	3,7	4,2	4,8	5,8	7,2	9,4	13,9			
0,8	<b>326,3</b>	5,9	6,8	8,0	9,8	12,7	18,1	32,4				$Q$ , л/с	$a_k$
0,75	<b>284,9</b>	11,0	13,5	17,6	25,2	46,8				126		<b>290,4</b>	0,6
0,7	<b>248,1</b>	20,4	28,0	45,3	164					106	53,2	<b>338,7</b>	0,65
0,65	<b>214,7</b>	39,5	70,1						69,1	38,4	27	<b>391,4</b>	0,7
0,6	<b>184,1</b>	88,3					92,1	37,5	24,2	18	14,4	<b>449,4</b>	0,75
					72,8	28,5	18,3	13,5	10,7	8,9	7,6	<b>514,7</b>	0,8
			25,3	14,7	10,4	8	6,6	5,6	4,8	4,2	3,8	<b>591,4</b>	0,85
		112	4,1	3,5	3	2,6	2,4	2,1	1,9	1,8	1,7	<b>690,6</b>	0,9
		1,3	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<b>853,4</b>	0,95
		689,1	562,5	533,6	503	470,4	435,5	397,4	355,4	307,6	251	← $Q_{полн}$ , л/с	
		15	10	9	8	7	6	5	4	3	2	$D=600$ мм	
		Уклон $i$ , тысячные											

\* $a_k$  – наполнение трубопровода в конце участка, доли

Таблица 2

**Коэффициенты регрессии для формулы (12)**

Относительный расход $Q^*$	$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	Средняя ошибка $\bar{\epsilon}$ , %
1,05	1,312	2,762	3,482	5,748	0,77
1,1	0,873	1,466	1,830	5,308	0,41
1,2	0,539	0,795	1,178	5,004	0,73
1,3	0,389	0,549	0,995	4,842	0,95
1,4	0,302	0,418	0,917	4,719	1,14
1,5	0,244	0,332	0,852	4,648	1,19
1,6	0,203	0,275	0,828	4,573	1,27
1,7	0,173	0,232	0,804	4,516	1,33
1,8	0,150	0,201	0,802	4,450	1,38

После проведенного анализа различных выражений (степенной, показательной, логарифмической, гиперболической и экспоненциальной функций) для аппроксимации выражения (10) выбрана степенная зависимость вида:

$$\Gamma_0 = k_0 - \frac{k_1}{\sqrt{1 + \frac{k_2}{a_k^{k_3}}}}, \quad (12)$$

где  $k_0, k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии рассчитывались по методу наименьших квадратов с поиском минимума суммы квадратов разностей для каждого соотношения расходов  $Q^*$  (табл. 2). Сравнение результатов, рассчитанных по уравнению (8) и формуле (12), показало хорошее совпадение в диапазоне наполнений трубопровода 0,3...0,95. Средняя ошибка аппроксимации  $\bar{\epsilon}$  не превысила 1,38 %.

**Пример инженерного расчета.** Участок коллектора дождевой канализации имеет длину  $l = 110$  м от последнего узлового колодца до насосной станции. Расчетный расход дождевых стоков составляет  $Q = 1250$  л/с. Требуется подобрать диаметр  $D$  и уклон

коллектора  $i_0$  при учете неравномерного течения и минимально допустимой скорости течения.

Принимаем соотношение расходов  $Q^* = 1,3$  и наполнение в конце участка  $a_k = 0,6$ , затем по графику на рисунке 2 находим значение геометрического симплекса  $\Gamma_0 = 0,24$ . Затем по формуле (9) определяем отношение  $i_0/D = \Gamma_0/l = 0,24 / 110 = 0,00218$ .

Принимаем диаметр коллектора  $D = 0,8$  м и получаем приемлемый уклон, равный  $i_0 = 0,00218/0,8 = 0,0027$ . Для сравнения: согласно расчетным таблицам [2, с. 398] при этом же уклоне и равномерном режиме был бы подобран коллектор диаметром не менее 1 м.

В ходе работы получены следующие результаты:

- уточнены расчетные графики и таблицы для определения пропускной способности самотечного трубопровода с учетом неравномерности движения жидкости;
- предложена аппроксимирующая степенная формула для упрощения расчета;
- определены коэффициенты регрессии для этой формулы, обеспечивающие хорошее совпадение в широком диапазоне наполнений самотечного коллектора.

### Литература

1. Курганов, А. М. Закономерности движения воды в дождевой и общесплавной канализации / А. М. Курганов. – Москва : Стройиздат, 1982. – 72 с.
2. Курганов, А. М. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации / А. М. Курганов, Н. Ф. Федоров. – Ленинград : Стройиздат, 1973. – 408 с.
3. Алексеев, М. И. Гидравлический расчет сетей водоотведения. Часть 1. Закономерности движения жидкости / М. И. Алексеев, Ф. В. Кармазинов, А. М. Курганов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 1997. – 128 с.
4. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1982. – 224 с.

*A.G. Gudkov, S.V. Kolobova, M.V. Pavlov, D.F. Karpov*  
*Vologda State University*

### **CALCULATION OF SEWAGE COLLECTORS WITH NON-UNIFORM FLOW OF WASTE WATER**

The method for determining the throughput capability of gravity flow sewage collectors with a non-uniform flow has been specified. Calculated graphs in dimensionless coordinates are presented. An approximating power-law formula is proposed to simplify engineering calculations, the regression coefficients in the formula are determined.

Sewer pipe, sewerage, hydraulic calculation, non-uniform flow.