Э к о л о г и я

УДК 531, 533

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОДОПРОПУСКНОЙ СИСТЕМЫ ЛИВНЕВЫХ СТОКОВ ДЛЯ ГЕЛЕНДЖИКСКОЙ БУХТЫ[1]

Бунякин А. В.[2]

COMPUTATION OF PARAMETERS OF A RAINFALL DISCHARGE SYSTEM FOR THE GELENDZHIK BAY

Bunyakin A. V.

The work describes one of the variants of engineering a system of rainfall and sewage discharge system by the example of the bay in the town of Gelendzhik. The scheme and principle of operation of the rainfall discharge system described uses the topographical relief with level difference, which is typical to resort towns of the Black Sea coast. Moreover, it is possible to transport rainfall discharges for long distances in the sea without pump feeding. Nonstationary conditions of the flow stream are also possible, which has been also considered in the work.

Введение

В работе представлен один из вариантов проектирования системы ливневых канализационных стоков на примере бухты города Геленджика. По имеющимся на данный момент сведениям, ливневые стоки, содержащие вредные для экологии и здоровья людей примеси и взвеси, сливаются непосредственно в акваторию Геленджикской бухты. Это одна из проблем данного курортного города.

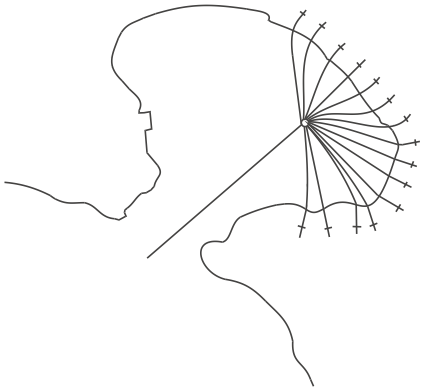

Рис. 1

В предлагаемой водопропускной системе пятнадцать шлейфов, отводящих ливневые стоки с улиц Геленджика, проложенные по дну бухты, сходятся лучами на расстоянии порядка 800 м от берега в один коллектор (рис. 1). Диаметры шлейфов, порядка 600 мм, длины около 1 км каждый. Шлейфы представляют собой герметично соединенные трубы и имеют верхнюю точку присоединения к уличной ливневой канализации на высоте порядка 10 м над уровнем моря. Зона, непосредственно прилегающая к морю, должна иметь отдельную систему ливневых каналов.

Необходим по возможности наибольший радиус кривизны шлейфов, внутри них прокладывается трос для чистки ершами. На берегу перед входом в воду каждый шлейф должен иметь герметичный колодец, снабженный плотно закрывающимся люком, для установки блочно-механической системы, приводящей в движение трос.

Морской коллектор представляет собой цилиндр диаметром около 12 м и высотой порядка 10 м над уровнем моря. Шлейфы и коллектор необходимо изолировать от контакта с акваторией бухты.

В том месте, где предполагается расположить коллектор, на дне имеется впадина, максимальная глубина которой около 15 м. Шлейфы могут подходить к коллектору на глубине порядка 8–9 м. Дно коллектора при этом может быть на 7–8 м ниже выхода шлейфов. Это

[1]Работа выполнена при поддержке РФФИ р2003юг (03-01-96690).

[2]Бунякин Алексей Вадимович, канд. физ.-мат. наук, доцент Кубанского государственного технологического университета.

пространство должно играть роль отстойника, из которого механическим способом могут удаляться твердофазные нечистоты.

Ближайший к берегу сточный колодец ливневой канализации (верхняя точка каждого из шлейфов) должен быть расположен так, чтобы его высота над уровнем моря была равна высоте коллектора, иначе либо заполнение коллектора почти на весь объем (в случае сильного дождя) будет невозможно, либо коллектор может переполниться.

Из коллектора в море через ворота бухты выходит отвод диаметром порядка 1 200 мм и длиной порядка 3 км, уложенный с уклоном. Вход из коллектора в отвод должен быть не ниже выходов шлейфов и подальше от них.

Водопропускная система работает следующим образом: дождевые стоки, заполняющие шлейфы, приводят к повышению уровня в коллекторе, что приводит в движение воду в отводе. При непрекращающемся дожде, после небольших колебаниях уровней, скорости течения в шлейфах и скорости в отводе за время порядка 10–15 мин система выходит на установившийся режим.

Как показывают расчеты, приведенные ниже, максимальная пропускная способность водоотводной системы с указанными параметрами, соответствующая девятиметровому (близкому к переполнению) уровню в коллекторе — это около 1,5 м^3 стоков в секунду. При этом надо иметь в виду, что свободный объем системы (надводная часть шлейфов и коллектора) имеет величину порядка 2 000 м^3. Таким образом, при непродолжительном летнем ливне, система сама по себе может вместить значительный объем сточных ливневых вод.

1. Постановка задачи о расчете пропускной способности водосточной системы и метод ее решения

Заданными считаются следующие величины: N, d, l, λ — соответственно количество, диаметр, длина, коэффициент гидравлического сопротивления шлейфа, которые предполагаются одинаковыми для всех шлейфов. D, L, Λ — диаметр, длина, коэффициент гидравлического трения отвода; S — площадь сечения (поверхности жидкости) в коллекторе; $W(t)$ — объем прибывающих в шлейфы сточных вод.

При заданном профиле укладки надводной части шлейфа: $h(X)$ — высота над уровнем моря; X — координата вдоль шлейфа, отмеряемая от берега. Задание этой функции равносильно заданию функции $H(t) = h\left(\frac{4W(t)\cos\alpha}{N\pi d^2}\right)$, которая, для примера расчета, взята в виде линейной зависимости (α — угол уклона шлейфов в верхней точке): $H(t) = H\frac{t}{T}$.

Неизвестными считаются следующие функции: $h(t)$, $v(t)$, $V(t)$ — соответственно уровень в коллекторе (превышение над уровнем моря), скорость течения в шлейфах (предполагается одинаковой во всех шлейфах), скорость течения в отводе.

При записи уравнений движения жидкости в шлейфах и в отводе используем второй закон Ньютона в виде

$$F = m\frac{dv}{dt} = \rho g(h - \Delta h)S, \quad m = \rho SL,$$

или

$$L\frac{dv}{dt} = g(h - \Delta h),$$

где v, L, h, Δh — соответственно скорость течения, длина трубы, действующий напор, гидравлические потери [1], g, t — ускорение свободного падения, t — время.

Движение жидкости в системе шлейфы – коллектор – отвод описывается
– уравнением движения жидкости в шлейфах

$$\frac{l}{g}\frac{dv}{dt} + \left(\lambda\frac{l}{d} + 1\right)\frac{v^2}{2g} = H\frac{t}{T} - h - \int\limits_0^t v(t)dt; \tag{1.1}$$

– уравнением движения жидкости в отводе

$$\frac{L}{g}\frac{dV}{dt} + \left(\Lambda\frac{L}{D} + \frac{3}{2}\right)\frac{V^2}{2g} = h; \tag{1.2}$$

– уравнением баланса расходов через коллектор

$$Sh = N\frac{\pi d^2}{4}\int\limits_0^t v(t)dt - \frac{\pi D^2}{4}\int\limits_0^t V(t)dt. \tag{1.3}$$

Начальные условия при $t = 0$: $v = V = 0$; $h = 0$.

Таким образом, математическая модель представляет собой систему интегро-дифференциальных уравнений первого порядка с интегральной частью типа Вольтерра [2].

Для численного решения выпишем дискретные аналоги уравнений (1.1)–(1.2) (Δt —

шаг по времени, переменная h исключена):

$$\frac{Sl}{g}\frac{v(t+\Delta t)-v(t)}{\Delta t}+\left(\lambda\frac{l}{d}+1\right)\frac{v(t)^2}{2g}S=$$
$$=SH\frac{t}{T}-\left(S+N\frac{\pi d^2}{4}\right)(q(t)+v(t+\Delta t))+$$
$$+\frac{\pi D^2}{4}Q(t);$$

$$\frac{SL}{g}\,\frac{V(t+\Delta t)-V(t)}{\Delta t}+\left(\Lambda\frac{L}{D}+\frac{3}{2}\right)\frac{V(t)^2}{2g}S=$$
$$=N\frac{\pi d^2}{4}q(t)-\frac{\pi D^2}{4}\left(Q(t)+V(t+\Delta t)\Delta t\right).$$

Из этих двух соотношений, используя уравнение (1.3), можно получить явный вид следующих величин:

$$v(t+\Delta t)=\frac{1}{\frac{Sl}{g\Delta t}+\left(N\frac{\pi d^2}{4}+S\right)\Delta t}\times$$
$$\times\left(\frac{Sl}{g\Delta t}v(t)+SH\frac{t}{T}-\left(\lambda\frac{l}{d}+1\right)\frac{v(t)^2}{2g}S-\right.$$
$$\left.-\left(S+N\frac{\pi d^2}{4}\right)q(t)+\frac{\pi D^2}{4}Q(t)\right),$$

$$V(t+\Delta t)=\frac{1}{\frac{SL}{g\Delta t}+\frac{\pi D^2}{4}\Delta t}\times$$
$$\times\left(\frac{SL}{g\Delta t}V(t)-\left(\Lambda\frac{L}{D}+\frac{3}{2}\right)\times\right.$$
$$\left.\times\frac{V(t)^2}{2g}S+N\frac{\pi d^2}{4}q(t)-\frac{\pi D^2}{4}Q(t)\right).$$

В уравнениях полагается

$$q(t+\Delta t)=q(t)+v(t+\Delta t)\Delta t,$$
$$Q(t+\Delta t)=Q(t)+V(t+\Delta t)\Delta t.$$

Начальные условия: $v(0)=V(0)=0$; $q(0)=Q(0)=0$.

Разностная схема при этом явная, типа предиктор — корректор: численные расчеты приводились при следующих значениях параметров водосточной системы: $N=15$, $d=0,6$ м, $l=1000$ м, $\lambda=0,03$ — параметры шлейфов; $D=1,2$ м, $L=3000$ м, $\Lambda=0,03$ — параметры отвода; $S=100$ м^2 — площадь сечения коллектора.

Скорость прибывания ливневых стоков, характеризующаяся параметром H/T, в расчетах изменялась.

2. Результаты расчета

На рис. 2–4 представлены результаты численного решения системы уравнений (1.1)–(1.3).

По горизонтальной оси время в секундах (нулевая отметка — начало поступления стоков в шлейфы).

Кривая 1, колеблющаяся с затуханием около почти постоянного значения ординаты соответствует скорости течения в шлейфах (v, м/с), кривая 2 — скорости течения в отводе (V, м/с), колеблющаяся, но при этом возрастающая, а затем убывающая кривая 3 — это превышение уровня жидкости в коллекторе над уровнем моря (h, м).

Параметр, значение которого указано под графиком, имеет смысл скорости прибывания уровня воды в шлейфах (в верхних точках их заполнения), при условии, что течение из них в коллектор отсутствует (наполнение шлейфов как сосудов). Для графиков, приведенных на рис. 2–4 , это значение соответствует 5–15 см/с. Механизм возбуждения колебаний (на графиках — это волнообразность линий) следующий: шлейфы и коллектор можно представлять как сообщающиеся сосуды, в один из которых наливают жидкость (шлейфы), перетекающую во второй. После этого возникают постепенно затухающие колебания уровней, причем в сосуде большего сечения (коллектор) колебания меньше заметны, то есть приводят к меньшим смещениям поверхности. В отводе при этом колебания почти отсутствуют, скорость течения сначала плавно возрастает, разгоняясь до значения, большего чем то значение, которое соответствует превышению уровня в коллекторе по гидравлическим потерям. Жидкость движется по инерции, затем скорость течения более плавно убывает.

Выводы

На рис. 2 показана наиболее вероятная ситуация работы водопропускной системы, расход порядка 0,5 м^3/с, который соответствует превышению уровня в коллекторе около 1 м над уровнем моря.

Дальнейшее увеличение скорости прибывания воды в шлейфах показывает, что для обеспечения максимально допустимого для описанной системы расхода 1,75 м^3/с, превышение уровня в коллекторе должно быть около 11 м. Поскольку такой большой расход маловероятен, то высота 10 м была выбрана как

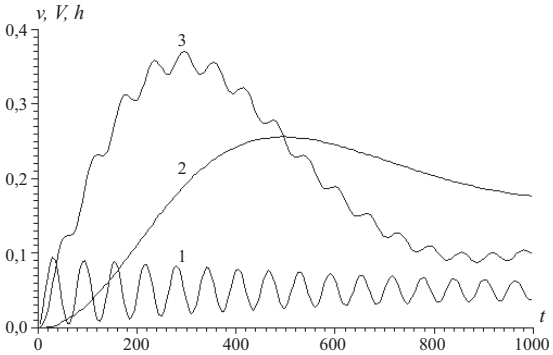

Рис. 2. Для значения $H/T = 0,05$ м/с

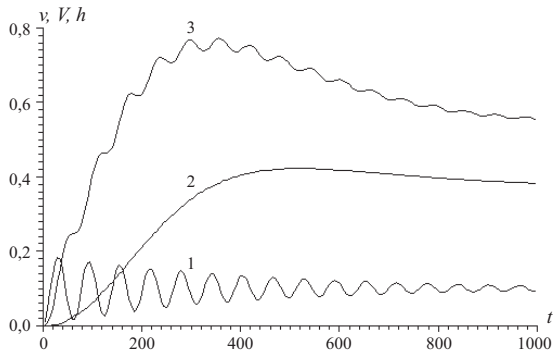

Рис. 3. Для значения $H/T = 0,1$ м/с

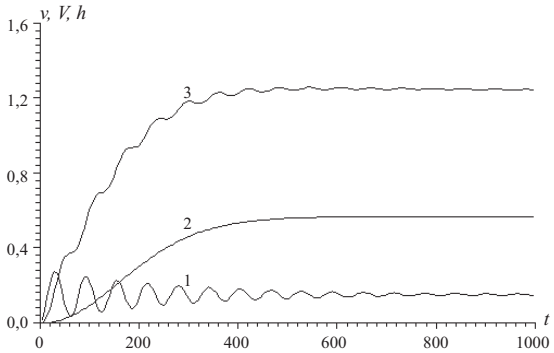

Рис. 4. Для значения $H/T = 0,15$ м/с

максимальная для коллектора данной водопропускной системы.

Для сравнения, пропуск максимального расхода $Q = 1,75$ м^3/с при напоре $H = 11$ м и КПД насоса $\eta = 0,25$ только через отвод с помощью насосной подачи возможен при затратах мощности $P = \rho g H Q/\eta = 755,37$ кВт.

Наиболее «слабое» место в предлагаемой схеме водопропускной системы — это отвод. Его длина (порядка 3 км) слишком велика, чтобы отвод можно было бы прочищать ершом на сквозном тросе через систему механических блоков. Поэтому для профилактических прочисток можно применять гидравлический способ. А именно, вход из коллектора в отвод должен быть снабжен фланцем с возможностью герметичного присоединения рукава из армированной резины, для того чтобы обеспечить возможность промывать отвод насосной установкой (с затрачиваемой мощностью порядка 1 МВт). Такие промывки должны иметь периодичность не чаще одного раза в год, поэтому стационарное расположение насоса над коллектором нецелесообразно, лучше изготовить для этого специальную плавучую установку.

Пропускная способность системы наиболее существенно зависит от диаметра отвода, так при сохранении максимально допустимой высоты уровня в коллекторе увеличение диаметра отвода в k раз приведет к увеличению максимального расхода (при уровне близком к переполнению) приблизительно в $k^{2,5}$ раз. Это необходимо соизмерить с увеличивающейся при этом стоимостью сооружения.

Литература

1. *Прозоров И. В., Николадзе Г. И., Минаев А. В.* Гидравлика, водоснабжение и канализация. М.: Высш. школа, 1990. 448 с.
2. *Цалюк З. Б.* Линейные интегральные уравнения Вольтерра / КубГУ, 1980. 70 с.

Статья поступила 28 декабря 2005 г.
Кубанский государственный технологический университет
© Бунякин А. В., 2006