

УДК 628.218

## НАПОРНОЕ – БЕЗНАПОРНОЕ ДВИЖЕНИЕ СТОКОВ В СИСТЕМАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ КОЛЬЦЕВОЙ СТРУКТУРЫ

Чупин Р.В., Шишелова Т.И., Бобер А.А.

ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет», Иркутск, e-mail: chupinVR@istu.irk.ru

В статье рассмотрены вопросы моделирования движения стоков в системах водоотведения кольцевой структуры. Такие системы имеют место при реконструкции и развитии систем водоотведения. Величины расходов стоков, которые распределяются по отдельным кольцевым коллекторам, предлагается определять на основе решения уравнений сохранения массы и энергии. При этом возникают случаи, когда течение жидкости происходит в безнапорном, напорном и напорно-безнапорном режимах движения стоков. В первом случае стоки по кольцевым коллекторам рассматриваются как истечение жидкости из резервуаров – колодцев, и предлагается вычислять их значения по соответствующим формулам гидравлики. Во втором предлагается определять величины расходов стоков по коллекторам в результате решения задачи потокораспределения в напорной кольцевой сети, в третьем случае расходы стоков вычисляются по методике, представляющей комбинацию двух предыдущих случаев. В статье приведены уравнения для случаев напорного, напорно-безнапорного и безнапорного движения стоков, а также даны примеры расчетов всех этих случаев.

**Ключевые слова:** системы водоотведения кольцевой структуры, расчет расходов стоков по коллекторам, напорно-безнапорное движение стоков

## THE PRESSURE – NON-PRESSURE MOVEMENT OF DRAINS IN RING SYSTEMS OF WATER REMOVAL

Chupin R.V., Shishelova T.I., Bober A.A.

National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, e-mail: chupinVR@istu.irk.ru

Questions of modeling of the motion sewer are considered in article in systems to sewerages recirculating structure. Such systems exist at reconstructions and development of the systems sewerages. The values of the expenses sewer, which are distributed on separate parallel collector, is offered define on base of the decision of the equations of the conservation of the mass and energy. Herewith, appear the events, when distribution liquids occurs in free, pressure and pressure- to sewerages mode current living sewer. In the first event sewers on parallel collector are considered as outflow to liquids from reservoir – a pit and is offered calculate their importances on corresponding to form-bark of the hydraulics. In second – is offered define the values of the expenses sewer on collector in as a result decisions of the problem sharing the flow in pressure recirculating network, in the one third event expenses sewer are calculated on methods, presenting combination two previous events. Equations are brought in article for events pressure, pressure- free and free of the motion sewer, as well as are given examples calculation all these events.

**Keywords:** the systems to sewerages recirculating structure, calculation of the expenses sewer on collector, pressure- to sewerages motion sewer, calculation of the expenses sewer on collector, pressure-non-pressure motion sewer

При проектировании самотечной системы водоотведения общепринято принимать структуру сети в виде дерева, в которой вершины – абоненты, корень дерева – приемные резервуары очистных канализационных сооружений. Такая структура сети эффективна при эксплуатации, экономична и не требует дополнительных систем управления потоками. Вместе с тем в ходе развития городских территорий приходится решать задачи по увеличению мощностей и пропускных способностей коллекторов, что требует перекладки трубопроводов, устройства насосных перекачивающих станций и других мероприятий, направленных на нормализацию работы системы водоотведения в целом. Чаще всего для этого применяются кольцевые, разгрузочные коллекторы. Конструкции таких коллекторов разнообразны и представлены на рис. 1.

Отдельные кольцевые трубопроводы могут быть как безнапорные, так и работа-

ющие в напорном режиме. Возможны случаи установки насосных станций перекачки стоков, параллельные напорные трубопроводы с каскадом насосных станций и др.

В существующей практике эксплуатации для управления потоками в кольцевых коллекторах применяют «шиберы» – устройства для уменьшения или увеличения сечения того или иного коллектора. Как правило, шиберы имеют ручной или полуавтоматизированный принцип действия, но в современных условиях возможно и дистанционное управление ими. Для эффективного управления такими устройствами необходимо исследовать гидравлические особенности распределения потоков в кольцевых безнапорных и напорно-безнапорных системах водоотведения.

Известно, что в напорных кольцевых сетях потокораспределение подчиняется законам сохранения массы и энергии и интерпретируется в виде аналога законов

Кирхгофа [1]. Задачи потокораспределения в напорных сетях исследованы, и имеется множество программных разработок, по-

зволяющих оперативно определять потоки как по системе в целом, так и по ее отдельным фрагментам и элементам [1].

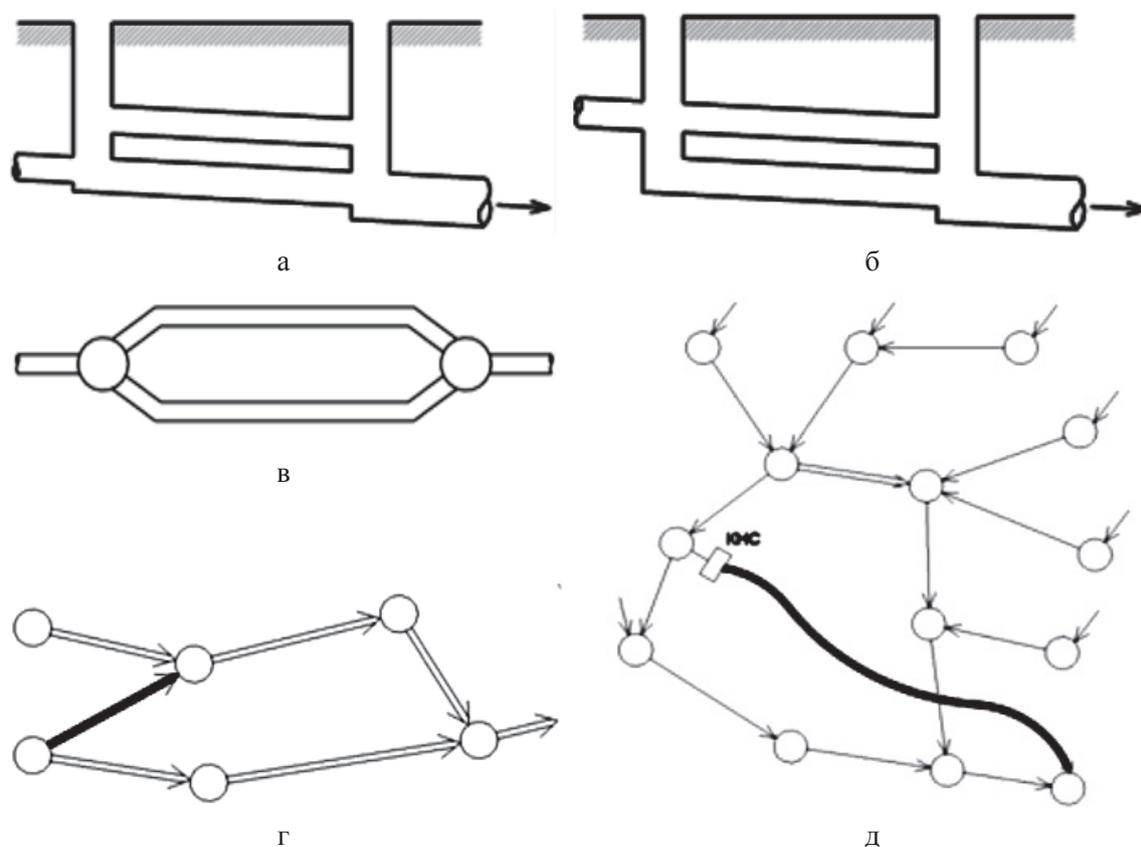


Рис. 1. Схемы кольцующих коллекторов систем водоотведения:  
 а, б – вертикальная прокладка кольцующего коллектора; в – горизонтальная прокладка кольцующего коллектора; г, д – переброска стоков из одного бассейна канализования в другой самотечным и напорным коллекторами

Для напорно-безнапорных кольцующих коллекторов потокораспределение также будет подчиняться законам сохранения массы и энергии. В качестве примера рассмотрим систему водоотведения, состоящую из двух участков (рис. 2).

Допустим, что в колодец поступает сточная вода в размере  $Q$  ( $m^3/c$ ) и растекается по двум коллекторам. Уклоны, длины, диаметры коллекторов известны. Предположим, что на участках 1 и 2 устанавливается такой напорный режим, что в центральном колодце пьезометрический напор будет равен  $P$ , в м водяного столба, далее просто в м (см. рис. 2). При этом стоки после прохождения коллекторов изливаются в атмосферу, и дальнейшее их движение происходит в безнапорном режиме. В этом случае расходы по коллекторам можно вычислить, используя следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} P = Z_{k1} + Q_1^2 \cdot \left( \frac{1}{\mu^2 \cdot \omega_1^2 \cdot 2g} + S_{тр1} \right) \\ P = Z_{k2} + Q_2^2 \cdot \left( \frac{1}{\mu^2 \cdot \omega_2^2 \cdot 2g} + S_{тр2} \right) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $Z_k, Z_n$  – геодезические отметки дна коллектора в конце и в начале расчетного участка длиной  $l$ ;  $S_{тр}$  – сопротивление трубопровода, вычисляемое по формуле

$$S_{тр} = \frac{0,08 \cdot \lambda \cdot l}{d^5};$$

$\lambda$  – коэффициент гидравлического трения трубопровода диаметром  $d$  (м), равный  $\lambda = 0,11 \cdot (0,0001/d)^{0,25}$ ;  $\mu$  – коэффициент расхода отверстия диаметром  $d$ , обычно  $\mu = 0,62$ , но в отдельных случаях находится в пределах 0,59–0,64;  $\omega = \pi d^2/4$  – площадь поперечного сечения трубопровода.

Для решения системы уравнений (1) относительно неизвестных  $P$ ;  $Q_1$ ;  $Q_2$  добавим уравнение материального баланса:

$$Q_1 + Q_2 = Q, \quad (2)$$

и таким образом определим расходы по коллекторам и напор в центральном колодце.

Такие расчеты можно выполнить и для  $n$  коллекторов, отходящих от анализируемого колодца. В общем виде систему уравнений можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} P = Z_{k1} + Q_1^2 \cdot \left[ \frac{0,215}{d_1^4} + \frac{0,08 \cdot \lambda_1 \cdot l_1}{d_1^5} \right]; \\ \dots\dots\dots; \\ P = Z_{kn} + Q_n^2 \cdot \left[ \frac{0,215}{d_n^4} + \frac{0,08 \cdot \lambda_n \cdot l_n}{d_n^5} \right]; \\ Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q. \end{cases} \quad (3)$$

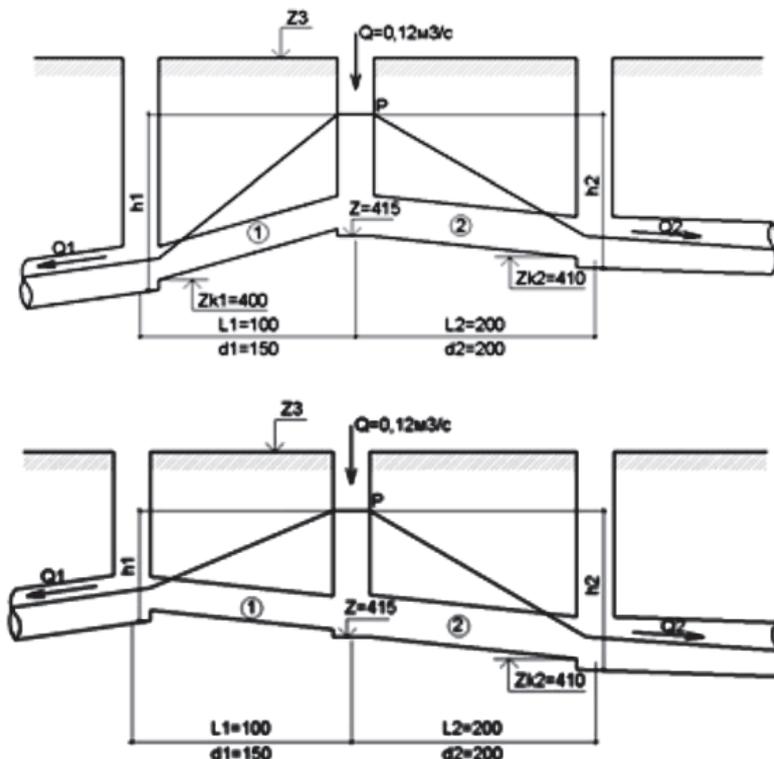


Рис. 2. Определение расходов в кольцевых напорно-безнапорных коллекторах

Если  $P > Z_3$ , где  $Z_3$  – отметка земли у колодца, то система водоотведения не пропустит расход  $Q$ , и часть стока будет выливаться на поверхность земли. Величину стоков, которые будут выливаться на поверхность

земли, можно вычислить согласно методике, изложенной в работах [3–5]. Принимая величину напора равной отметке поверхности земли:  $P = Z_3$ , систему уравнений (3) можно представить в виде:

$$\begin{cases} Q_1 = \sqrt{\frac{(Z_3 - Z_{k1})}{\left[ \frac{0,215}{d_1^4} + \frac{0,08 \cdot \lambda_1 \cdot c_1}{d_1^5} \right]}}; \\ \dots\dots\dots; \\ Q_n = \sqrt{(Z_3 - Z_{kn})} / \sqrt{\left[ \frac{0,215}{d_n^4} + \frac{0,08 \cdot \lambda_n \cdot c_n}{d_n^5} \right]}; \\ Q_{n3} = Q - (Q_1 + \dots + Q_n), \end{cases} \quad (4)$$

откуда можно определить расход  $Q_{н3}$ , который будет истекать на поверхность земли.

*Пример 1.* Для схемы коллекторов, представленных на рис. 2, система уравнений (3) имеет вид:

$$\begin{cases} P = 400 + 17369,0 \cdot Q_1^2; \\ P = 410 + 7634,4 \cdot Q_2^2; \\ Q_1 + Q_2 = 0,12. \end{cases}$$

$$P = 400 + 17369 \cdot (0,0515)^2 = 400 + 46,06 = 446,06 \text{ м};$$

$$P = 410 + 7634,4 \cdot (0,0685)^2 = 410 + 35,82 = 445,82 \text{ м}.$$

Уровень воды в колодце установится на отметке 446 м. Если отметка земли у колодца будет соответствовать 420 м, то часть стока будет выливаться на поверхность земли. При этом расходы стоков по коллекторам и суммарный расход можно вычислить из (4):

$$420 = 400 + 17369 \cdot Q_1^2;$$

$$420 = 410 + 7634,4 \cdot Q_2^2,$$

откуда получим:

$$Q_1 = \sqrt{\frac{20}{17369}} = 0,034 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_2 = \sqrt{\frac{10}{7634,4}} = 0,036 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Решая данную систему, имеем:

$$Q_2^1 = 0,35;$$

$$Q_2^4 = 0,0685 \text{ м}^3/\text{с},$$

следовательно,

$Q = Q_1 + Q_2 = 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$  – это расход, который пропустит система водоотведения. Следовательно, стоки в размере  $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$  будут изливаться на поверхность земли.

Можно определить  $P$  и оценить, какой будет режим в коллекторах. Обозначим  $Z$  как геодезическую отметку дна колодца. Тогда при  $P - Z < d < d$  режим движения стоков будет безнапорным, в противном случае он может быть либо напорным, либо напорно-безнапорным.

Рассмотрим режимы движения стоков при вертикальной прокладке кольцевого коллектора (рис. 3). Для такого случая возможны следующие режимы течения стоков:

- напорный режим во всех коллекторах;
- напорный режим только в нижнем коллекторе.

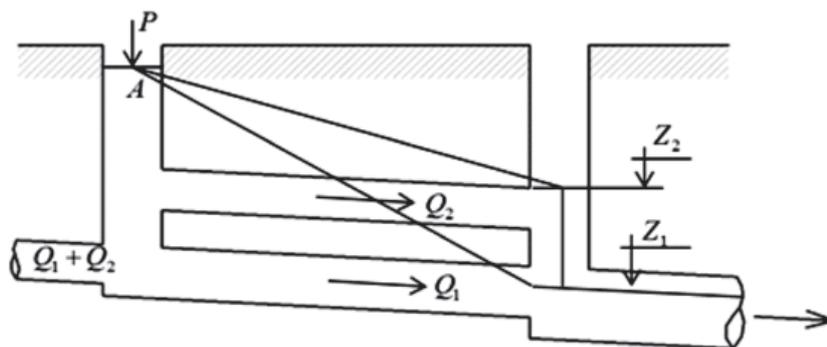


Рис. 3. Расчет кольцевого вертикального коллектора в напорном режиме

В первом случае расходы по коллекторам можно определить согласно системам уравнений (3), (4). Во втором случае напорный режим установится во втором колодце ( $P_2$ ), и не будет свободного истечения в атмосферу, тогда распределение потоков между нижним и верхним колодцем будут подчиняться законам Кирхгофа. В этом случае достаточно решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{0,08 \cdot \lambda_1 \cdot l_1}{d_1^2} \cdot Q_1^2 = \frac{0,08 \cdot \lambda_2 \cdot l_2}{d_2^2} \cdot Q_2^2; \\ Q_1 + Q_2 = Q; \\ P_1 = P_2 + \frac{0,08 \cdot \lambda_1 \cdot l_1}{d_1^2} \cdot Q_1^2. \end{cases} \quad (5)$$

Неизвестными величинами в этих уравнениях являются  $Q_1, Q_2, P_1$ . После вычисления  $P_1$  можно определить режим течения стоков в верхнем коллекторе.

Если окажется, что  $P > Z_3$ , т.е. напор будет больше отметки земли колодца, то в этом случае произойдет излив стоков на поверхность земли, величину которого можно вычислить согласно формулам (4).

В общем случае расчет таких коллекторов необходимо начинать с проверки пропуска стоков по нижнему коллектору в напорном режиме:

$$P = Z_{k1} + Q_0^2 \left\{ \frac{0,215}{d_1^4} + \frac{0,08 \cdot \lambda \cdot l_1}{d_1^5} \right\}.$$

Если  $Z_{H1} + d_1 < P < Z_{H2}$ , то весь расход будет транспортироваться по нижнему коллектору в напорном режиме.

Если  $P < Z_{H1} + d_1$ , то движение стоков в нижнем коллекторе будет происходить в безнапорном режиме, и весь сток пройдет по нижнему коллектору.

Если  $Z_{H2} < P \leq Z_{H2} + d_2$ , то движение стоков будет происходить по двум коллекторам, по нижнему – в напорном, по верхнему – в безнапорном режимах.

Для расчета безнапорного равномерно движения стоков применяется формула Антуана Шези, полученная им в 1775 г.:

$$Q = \omega \cdot c \cdot \sqrt{Ri},$$

где  $\omega$  – площадь живого сечения, вычисляемая по формуле:

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{48} - \frac{d^2}{180} \left( \pi \frac{\alpha}{180} - \sin \alpha \right)$$

(здесь  $\alpha$  – центральный угол, равный

$$\alpha = 2 \cdot \arccos \arccos \left( \frac{2h}{d} - 1 \right);$$

$h$  – глубина стоков в коллекторе);  $C$  – коэффициент Шези, равный  $C = \frac{R^y}{n}$  здесь

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

по формуле Майнинга  $y = \frac{1}{6}$ ;  $n$  – коэффициент шероховатости, который назначается в зависимости от материала труб и находится в пределах (0,011–0,017);  $R$  – гидравлический радиус,  $d, i$  – диаметр и уклон коллектора.

В случае работы коллектора полным сечением расход в трубопроводе можно определить по формуле:

$$Q_n = 0,4 \cdot d^{2,5} \cdot i^{0,5} \cdot C_n, \quad i > 0, \quad (6)$$

где  $C_n$  – коэффициент Шези, вычисленный для полного сечения.

Следует отметить, что если  $Q > Q_n$ , то режим движения стоков будет напорным. Поэтому, после вычисления расходов можно их сопоставить с  $Q_n$  и определить коллекторы и даже контуры, которые будут работать в напорном режиме.

Для определения нормальной глубины  $h$  в коллекторе предлагается формула [2]:

$$\left( \frac{Q}{Q_n} + 0,22 \right) \frac{d}{1,34} = h, \quad (7)$$

для  $0,25 \leq \frac{h}{d} \leq 0,9$ .

Для более точных расчетов величина  $h = P - Z_{H2}$  будет определять высоту живого сечения трубопровода:

$$\alpha = 2 \cdot \arccos \arccos \left( \frac{2 \cdot (P - Z_{H2})}{d} - 1 \right).$$

Следовательно, для напорного и безнапорного коллекторов получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} P = Z_{k1} + Q_1^2 \cdot \left[ \frac{0,25}{d_1^4} + \frac{0,08 \lambda_1 \cdot l_1}{d_1^5} \right], \\ P = Z_{H2} + \left( \frac{Q_2}{Q_n} + 0,22 \right) \frac{d_2}{1,34}, \\ Q = Q_1 + Q_2. \end{cases} \quad (8)$$

После определения расходов по коллекторам можно вычислить нормальную глубину в верхнем коллекторе и построить кривую свободной поверхности воды. Следует отметить, что уравнение истечения стоков в верхний коллектор будет трансцендентным относительно  $P$ , и поэтому система уравнений (8) будет решаться методом последовательных приближений.

*Пример 2.* Для случая, представленного на рис. 4,

$$Q_n = 0,4 d^{2,5} \cdot i^{0,5} \cdot C_n =$$

$$= 0,4 \cdot (0,2)^{2,5} \cdot (0,005)^{0,5} \cdot 9,6 = 0,005 \text{ м}^3/\text{с},$$

а уравнение (8) примет следующий вид:

$$\begin{cases} P = 400 + Q_1^2 \left[ \frac{0,215}{0,2^4} + \frac{0,08 \cdot 0,15 \cdot 200}{0,2^5} \right]; \\ P = 404 + \left( \frac{Q_2}{0,005} + 0,22 \right) \cdot 0,15. \end{cases}$$

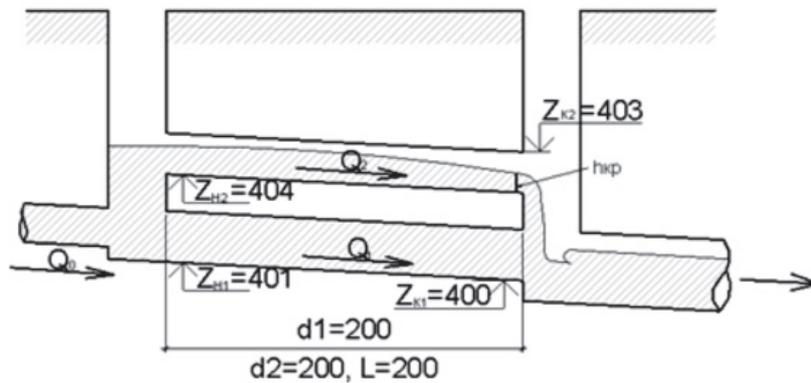


Рис. 4. Безнапорный режим в вертикальном кольцеобразном коллекторе

Пусть суммарный расход равен  $0,0231 \text{ м}^3/\text{с}$ . При пропуске всего расхода по нижнему коллектору получим  $P_1 = 404,1 \text{ м}$ . Имеем случай

$$Z_{H2} < P \leq Z_{H2} + d_2 \quad (404 < 404,1 < 404,2).$$

Уравнение истечения стоков в верхний коллектор будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \alpha = 2 \cdot \arccos \left( \frac{2 \cdot (P - 404)}{0,2} - 1 \right); \\ \omega = 0,0314 - 0,005 \cdot (0,0174\alpha - \sin \alpha); \\ P = 404 + 30 \cdot Q_2; \\ Q_2 = 0,0231 - Q_1, \end{cases}$$

где  $\omega$  – площадь незатопленного отверстия, рассматриваемая как функция пьезометрического напора в колодце. Очевидно,  $P$  лежит в диапазоне от 404,1 до 404. Решаем данную систему уравнений методом простых итераций. Задавая значение  $P$  для первого уравнения, находим значение  $Q_1$ . Вычисляем  $Q_2 = Q - Q_1$  и находим  $P$  из второго уравнения и т.д. до выполнения условия того, что  $P$  первого и второго уравнения совпадут. В итоге имеем:

$$Q_1 = 0,02308 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q_2 = 0,000019 \text{ м}^3/\text{с}, \\ \text{а } P = 404,09 \text{ м}.$$

Согласно (7) и при расходе полным сечением величиной  $Q_{II} = 0,00031 \text{ м}^3/\text{с}$ , нормальная глубина в верхнем коллекторе установится  $h_2 = 0,012 \text{ м}$ .

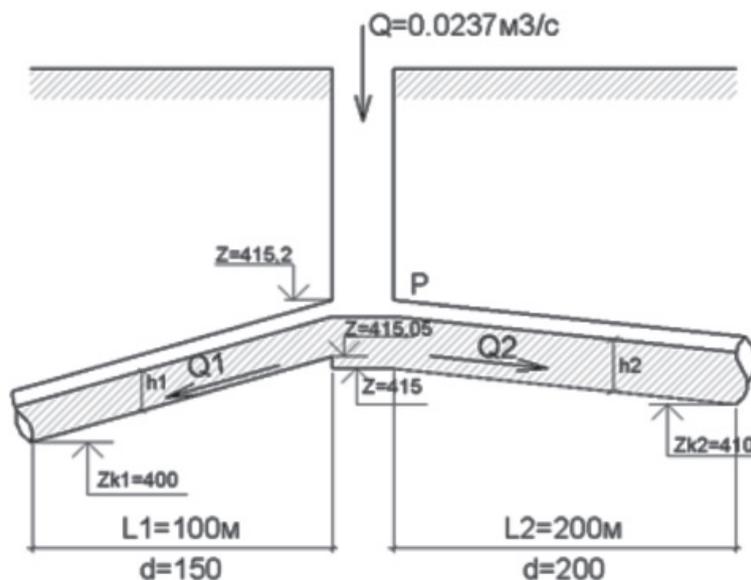


Рис. 5. Случай равномерного безнапорного движения стоков по коллекторам

В этом случае режим течения стоков в начале коллектора 2 будет неустановившимся равномерным, и будет наблюдаться кривая подпора с  $h_2 = 0,010$  до  $h_2 = 0,012$  м. Рассмотрим случай, когда в коллекторах устанавливается равномерное безнапорное течение стоков (рис. 5). Для этого случая имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} P = Z_{H1} + (Q_1 / Q_{1n} + 0,22)d_1 / 1,34; \\ P = Z_{H2} + (Q_2 / Q_{2n} + 0,22)d_2 / 1,34; \\ Q_1 + Q_2 = Q. \end{cases} \quad (9)$$

*Пример 3.* Для случая, представленного на рис. 5, решим систему уравнений (9) методом простых итераций. В итоге получим:

$$P = 415,1 \text{ м}; Q_1 = 0,0097 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_2 = 0,014 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Согласно уравнению (7) определяем нормальные глубины в коллекторах:

$$h_1 = \left( \frac{0,0097}{0,0652} = 0,149 + 0,22 \right) \frac{0,15}{1,34} = 0,041 \text{ м};$$

$$h_2 = \left( \frac{0,014}{0,0343} = 0,41 + 0,22 \right) \frac{0,2}{1,34} = 0,093 \text{ м}.$$

При таких глубинах:

$$P - Z_{H1} = 0,05 \text{ м}; h_1 = 0,041 \text{ м};$$

$$P - Z_{H2} = 0,1 \text{ м}; h_2 = 0,093 \text{ м}.$$

**Вывод:** имеем в первом и втором коллекторах кривые спада.

Таким образом, предлагаемые в работе подходы позволяют определять расходы стоков в кольцевых коллекторах, работающих в напорном, безнапорном и напорно-безнапорном режимах. Используя полученные зависимости, можно моделировать движение стоков в системах водоотведения произвольной конфигурации и решать задачи развития и реконструкции с обо-

снованием параметров кольцевых трубопроводов.

В условиях автоматизации распределения потоков с помощью данной методики можно заранее рассчитать управляющие воздействия на «шиберные» устройства и вычислить последствия их открытия или прикрытия.

#### Список литературы

1. Трубопроводные системы энергетики. Методы математического моделирования и оптимизации / под ред. Н.Н. Новицкого. – Новосибирск: Наука, 2010. – 419 с.
2. Алексеев М.И., Кармазинов Ф.К., Курганов А.М. Гидравлический расчет сетей водоотведения. Часть 1. – СПб.: Изд. СПб ГАСУ, 1997. – 128 с.
3. Чупин В.Р., Мелихов Е.С., Чупин Р.В. Развитие методики гидравлических расчетов систем водоотведения // Вода и экология. – 2010. – № 1, 2 (42). – С. 48–601.
4. Чупин В.Р., Мелехов Е.С., Чупин Р.В. Напорное движение стоков в безнапорных коллекторах // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 7. – С. 15–24.
5. Чупин Р.В., Мелехов Е.С. Развитие теории и практики моделирования и оптимизации систем водоснабжения и водоотведения. – Иркутск: Изд. ИрГТУ, 2011. – 323 с.

#### References

1. Truboprovodnye sistemy ehnergetiki. Metody matematicheskogo modelirovaniya i optimizacii. Pod red. N.N. Novickogo. Novosibirsk. Izd.: Nauka. 2010. 419 p.
2. Alekseev M.I., Karmazinov F.K., Kurganov A.M. Gidravlicheskiy raschet setej vo-dootvedeniya. Chast 1. Sankt-Peterburg. Izd.: SPb GASU. 1997. 128 p.
3. Chupin V.R., Melikhov E.S., Chupin R.V. Razvitie metodiki gidravlicheskiykh raschetov sistem vodoootvedeniya // Voda i ehkologiya. 2010. no. 1.2 (42). pp. 48–601.
4. Chupin V.R., Melekhov E.S., Chupin R.V. Napornoe dvizhenie stokov v beznapornykh kollektorakh // Vodospabzhenie i sanitarnaja tehnik. 2010. no. 7. pp. 15–24.
5. Chupin R.V., Melekhov E.S. Razvitie teorii i praktiki modelirovaniya i optimiza-cii sistem vodosnabzheniya i vodoootvedeniya. Irkutsk. Izd. IrGTU. 2011. 323 p.

#### Рецензенты:

Тимофеева С.С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой инженерной экологии и охраны окружающей среды ИрГТУ, г. Иркутск;

Кульков В.Н., д.т.н., профессор кафедры инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения ИрГТУ, г. Иркутск.

Работа поступила в редакцию 30.11.2012.