УДК 628.21

РЕЖИМЫ РАБОТЫ КАНАЛИЗАЦИОННОГО НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА, ПРОЛОЖЕННОГО ПО ПЕРЕМЕННОЙ МЕСТНОСТИ

Т.В. КОЗИЦИН
(Полоцкий государственный университет)

Рассматриваются режимы работы канализационного напорного трубопровода, проложенного по переменной местности, и подбор соответствующего насосного оборудования. Чередование восходящих и нисходящих участков трубопровода связано с возникновением режимов работы, которые могут значительно отличаться от расчетного. Неучет этих режимов может приводить к появлению нестабильной работы всей системы водоотведения и, в частности, к преждевременному выходу из строя насосного оборудования. Эти режимы главным образом имеют место при пуске насосного оборудования и в значительной степени зависят от наличия систем удаления воздуха из трубопровода. Приведен анализ причин возникновения переходных режимов работы канализационных трубопроводов, рассмотрено их влияние на работу насосной станции. Показано, что при подборе насосного оборудования для трубопровода, проложенного по переменной местности, необходимо учитывать все возможные режимы работы, чтобы не допускать выхода из строя насоса или мотора.

Введение. Выбор насосного оборудования для канализационных насосных станций является одним из наиболее ответственных этапов создания надежной и экономичной системы отвода сточных вод на очистные сооружения. Для корректного подбора насосов необходимо иметь точные данные по системе напорных трубопроводов, по которым планируется перекачка стоков. Характеристику системы трубопроводов принято описывать зависимостью требуемого напора от расхода [1, 2]:

$$H_T = H_Г + SQ^2, \tag{1}$$

где H_T – требуемый напор, м; $H_Г$ – геометрическая высота подъема, м; S – сопротивление системы трубопроводов, м/(л/с)^2; Q – подача насосов, л/с.

Как правило, геометрическую высоту подъема определяют как разницу отметок жидкости в приемной камере очистных сооружений и в приемном резервуаре насосной станции. Сопротивление системы трубопроводов (S) принято определять при расчетном режиме работы, который соответствует максимальной подаче насосов при установившемся режиме работы насосной станции.

Сточные воды населенных пунктов с целью экономии электроэнергии отводятся, как правило, по самотечным трубопроводам, а насосные станции стремятся устанавливать как можно ближе к очистным сооружениям [3, с. 130 – 132]. В результате напорные водоводы обычно имеют небольшую длину и проходят по равномерной местности. Поэтому определение геометрической высоты подъема и сопротивления трубопроводов по вышеуказанному подходу является оправданным. Однако сточные воды некоторых населенных пунктов могут обрабатываться на очистных сооружениях крупных промышленных предприятий, которые могут располагаться на значительном удалении. Например, протяженность линии напорных канализационных трубопроводов от г. Полоцка до очистных сооружений составляет около 18 км. Причем в таких случаях трубопровод часто проходит по переменной местности через холмы, овраги, ручьи и т.п. Построение характеристики таких трубопроводов – сложная задача. Это связано со следующими основными факторами:

1) поэтапное заполнение участков трубопровода в момент пуска системы;
2) образование воздушных мешков и срыв вакуума;
3) возможная работа трубопровода в самотечном режиме на отдельных нисходящих участках;
4) влияние газовой фазы на гидравлику движения жидкости в трубах.

Особенности совместного движения жидкости и газа. Движение газожидкостных потоков в трубах по своей природе значительно сложнее, чем движение жидких сред. Это обусловлено следующими особенностями совместного движения жидкости и газа:

- наличием внутренней границы раздела между фазами, положение которой в общем случае меняется в пространстве и во времени с образованием многообразных структурных форм течения;
- относительным движением фаз, зависящим от их физических свойств и перепада давления по длине трубопровода;
- появлением дополнительных гидродинамических затрат энергии, вызванных пульсацией концентраций фаз в потоке, и неполной компенсацией потерь напора на преодоление веса столба смеси на восходящих и нисходящих участках трубопроводов вследствие различной ее плотности на этих участках;

- взаимным влиянием фаз потока, проявляющимся в эффектах ранней турбулизации при расслоенном течении, росте динамической вязкости в диспергированных течениях;
- непрерывным изменением состояния системы, вызывающим массообменные процессы между фазами.

При визуальных наблюдениях за состоянием поверхности раздела газожидкостных смесей типа воздух – вода при движении в трубах были установлены следующие наиболее характерные формы течения: самотечная, пробковая, эмульсионная, пленочно-дисперсная.

Возникновение и устойчивость того или иного режима течения определяется совокупностью независимых переменных, которыми являются физические свойства фаз (плотность, вязкость, поверхностное натяжение), расходные параметры (скорость смеси, объемное расходное газосодержание), геометрия и ориентация трубопровода в поле массовых сил. Так, в подъемном течении основными формами течения являются пробковая, эмульсионная (или пузырьковая) и пленочно-дисперсная (рис. 1). В вертикальных трубах пробки газа принимают форму снарядов, движущихся по оси трубы, и поэтому эту форму течения называют еще снарядной. При горизонтальном и спускном течении наряду с названными существует самотечная форма.

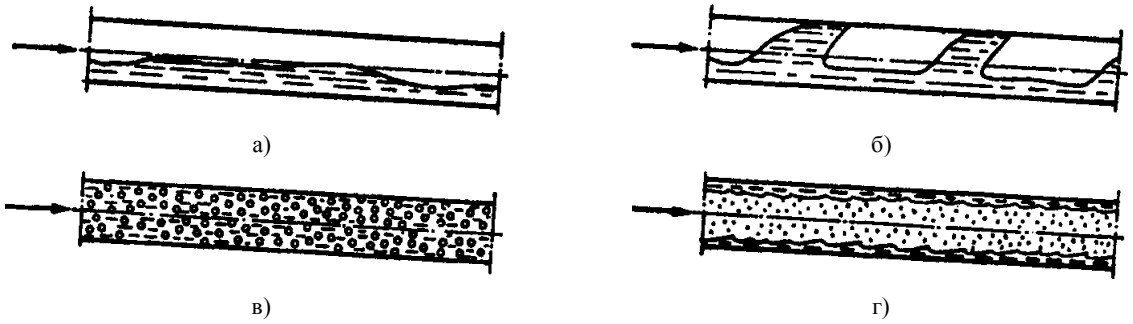

Рис. 1. Формы течения газожидкостных смесей:
а – самотечная; б – пробковая; в – эмульсионная (пузырьковая); г – пленочно-дисперсная

Особенностью движения стоков в канализационном коллекторе большой длины является снижение давления по длине и непрерывное образование газовой фазы в виде небольших по размеру газовых пузырьков, которые способствуют образованию газированной жидкости. Поэтому в потоках газожидкостных смесей с массообменом не происходит полного гравитационного разделения фаз, что оказывает определенное влияние на закономерности изменения гидравлических характеристик потока.

Для заданного газосодержания та или иная форма течения может устанавливаться при определенном соотношении между параметром $Fr/\Delta\rho$, характеризующим способность системы к расслоению, и числом Вебера, характеризующим способность системы к диспергированию. Таким образом, критерием устойчивости является число Кутателадзе:

$$K = \left(\frac{Fr \cdot \rho_{ж}}{We \cdot \Delta\rho}\right)^{0,25} = \frac{\upsilon\sqrt{\rho_{ж}}}{\sqrt[4]{g\delta\Delta\rho}}, \qquad (2)$$

где Fr – число Фруда; We – число Вебера; $\Delta\rho$ – разность плотностей жидкости и газа, кг/м^3; υ – средняя скорость смеси, м/с; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; δ – поверхностное натяжение на границе раздела жидкость – газ.

Наиболее распространенной формой течения газожидкостных смесей в горизонтальных и восходящих трубах является пробковая. В нисходящих трубах чаще других имеют место две формы течения – самотечная и пробковая. Граница перехода от расслоенного течения газожидкостных смесей с массообменном к пробковому в нисходящих трубах определяется соотношением:

$$K = 2,25(1 + 0,25\sqrt{2i/\lambda})/(1 - \beta_г), \qquad (3)$$

где i – гидравлический уклон; λ – коэффициент гидравлического сопротивления при безнапорном течении жидкости; $\beta_г$ – объемное расходное газосодержание.

Относительное движение фаз в газожидкостном потоке обусловлено тем, что при наличии перепада давления в трубопроводе на газовые включения действует сила, аналогичная архимедовой.

Особенностью движения газового пузыря в несущей среде, отличающей его от движения твердого тела, является изменение формы пузыря в зависимости от условий обтекания его несущей средой. При

этом коэффициент сопротивления деформируемого пузыря не может оставаться постоянным при турбулентном обтекании, как, например, твердого шара.

Гидравлическое сопротивление газожидкостных смесей при пробковой форме течения отличается от гидравлического сопротивления однофазных потоков тем, что помимо диссипации энергии вследствие внутреннего трения и турбулентных пульсаций в них имеет место диссипация энергии вследствие так называемых макротурбулентных пульсаций. Перемещающиеся с относительной скоростью газовые пробки вызывают дополнительное перемешивание жидкости, на что затрачивается энергия.

На восходящих участках трубопровода содержание газа всегда меньше. В нисходящих участках содержание газа всегда больше, чем в восходящих, при одинаковых остальных параметрах. Поэтому плотность смеси в восходящих участках трубопровода больше плотности смеси в нисходящих участках. Это приводит к возрастанию потерь напора при движении газожидкостных смесей в случае увеличения числа восходящих и нисходящих участков при одном и том же положении начальной и конечной точек трубопровода и одной и той же его длине, так как затраты энергии на преодоление веса столба смеси повышенной плотности на восходящих участках не компенсируются энергией от действия столбов смеси пониженной плотности на нисходящих участках. Поэтому при гидравлическом расчете трубопроводов требуется знать не только положение их начальной и конечной точек, но и профиль трассы трубопровода.

Геометрическая высота подъема. Рассмотрим напорный трубопровод, представленный на рисунке 2. При пуске насоса, когда трубопровод пустой, насос должен поднять воду с уровня $\nabla ПР$ = 0 м до уровня ∇B_1 = 20 м, а после заполнения трубопровода $ПР - B_2$ он должен поднять жидкость на высоту ∇B_3 = 15 м.

Важным фактором в работе напорного трубопровода, проложенного по переменной местности, является удаление воздуха. Если воздух не удаляется из трубопровода, геометрическая высота определяется как сумма высот всех восходящих трубопроводов: $ПР - B_1$ и $B_2 - B_3$, так как при этом тратится дополнительная энергия на сжатие воздуха в нисходящем участке [5, с. 20]. Поэтому требуется большая энергия для преодоления высотных точек. После вытеснения воздуха из трубопровода трубопровод наполняется полностью. Поэтому напор, который должен обеспечить насос, определяется лишь перепадом высот между выходом в приемной камере (ПК) и уровнем стоков в насосной станции.

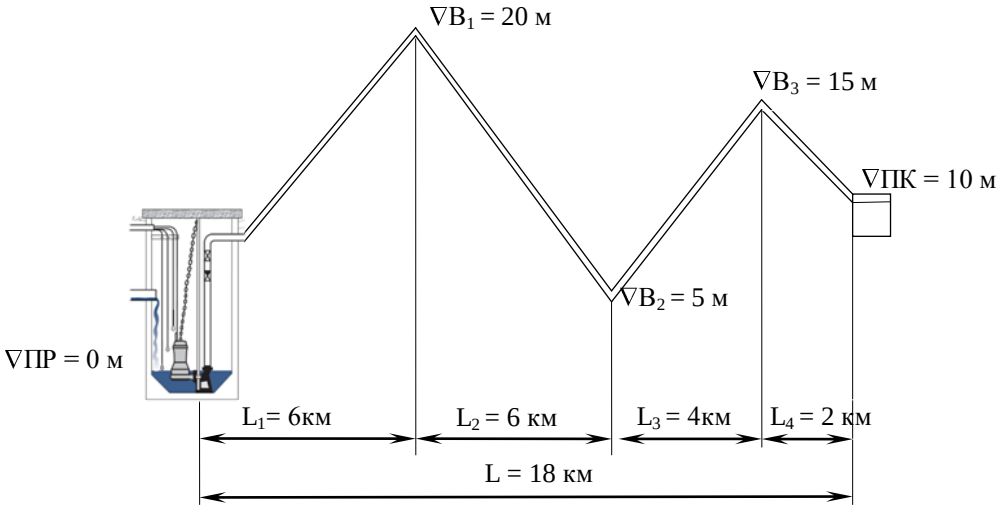

Рис. 2. Схема насосной станции с напорными трубопроводами, уложенными по переменной местности

Таким образом, в начальный момент времени для заполнения всех участков насос должен поднять стоки на высоту:

$$H_{Г\max} = (\nabla B_1 - \nabla ПР) + (\nabla B_3 - \nabla B_2) = (20 - 0) + (15 - 5) = 30 \text{ м}.$$

Когда трубопровод $ПР - B_3$ заполнится стоками, геометрическая высота уменьшится:

$$H_Г = (\nabla B_3 - \nabla ПР) = (10 - 0) = 10 \text{ м}.$$

Если воздух удаляется из трубопровода, то при включении насоса следует учитывать только разность между уровнем воды в насосной станции и самой высокой точкой (B_1). Во время установившейся работы трубопровода режим такой же, как и без удаления воздуха.

Таким образом, переменная местность может являться причиной резкого увеличения требуемого напора при пуске насосов. В случае значительного превышения отметки наивысшей точки трубопровода над отметкой приемного резервуара возможен отказ работы насосного оборудования.

Характеристика системы трубопроводов. При анализе работы напорного трубопровода без удаления воздуха необходимо так же учитывать возможность работы отдельных участков в самотечном режиме. Это будет происходить, если гидравлический уклон будет меньше уклона прокладки трубопровода. В качестве примера рассмотрим работу трубопровода, показанного на рисунке 2. Примем диаметр трубопровода 500 мм, участки *ПР* – B_1 и B_2 – B_3 уложены с уклоном i = 2,5 м/км. Для такого трубопровода при расходах до 177 л/с гидравлический уклон будет меньше уклона самого трубопровода, и стоки будут отводиться в безнапорном режиме, свыше 177 л/с – будет характерен напорный режим работы [6, табл. 12]. Соответственно, при расходах до 177 л/с в трубопроводе будет сохраняться воздух, и в напорном режиме будут работать участки *ПР* – B_1, B_2 – B_3 и характеристика трубопровода (1) будет выглядеть следующим образом:

$$H_T = H_Г + SQ^2 = 20 + 4,788 \cdot 10^{-4} \cdot Q^2.$$

Для расходов свыше 177 л/с в напорном режиме будет работать весь трубопровод, и его характеристика будет описываться следующей зависимостью:

$$H_T = H_Г + SQ^2 = 10 + 1,436 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2.$$

На рисунке 3 представлена характеристика трубопровода для обоих рассматриваемых случаев.

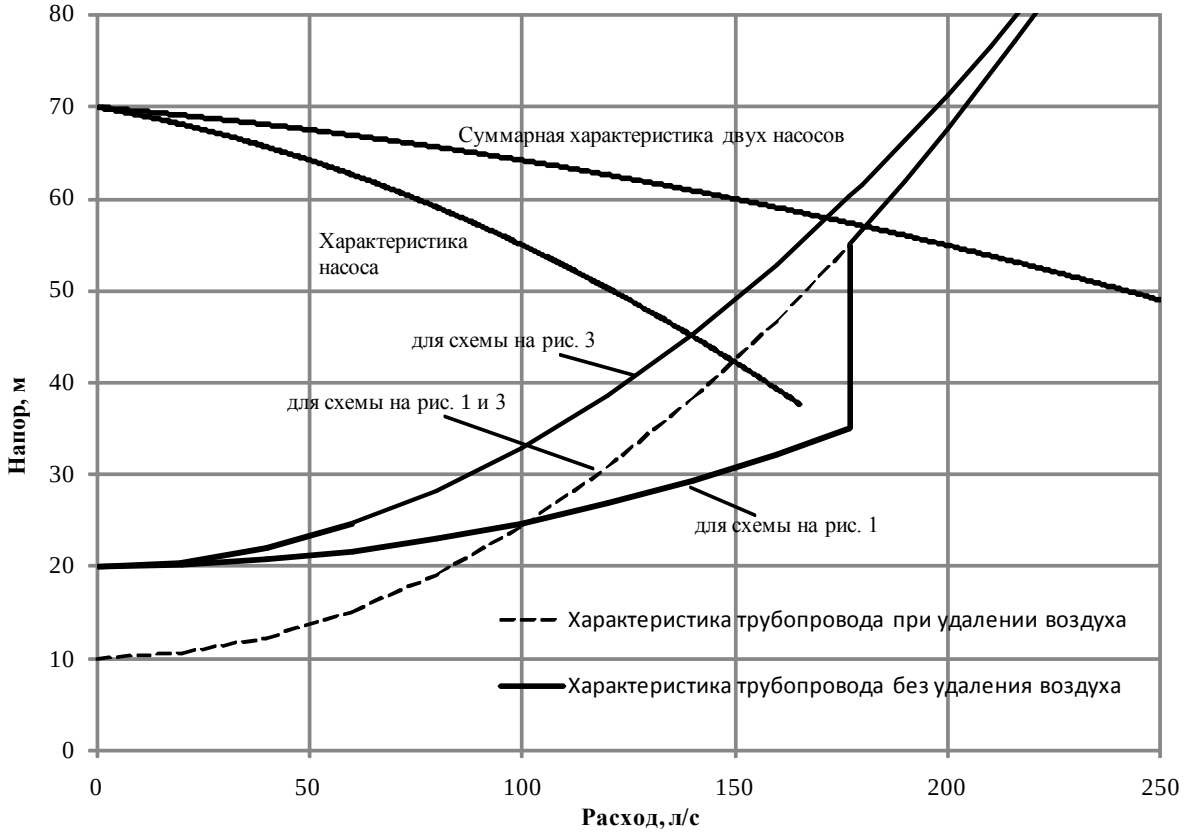

Рис. 3. Совмещенная характеристика напорного канализационного трубопровода и насосов

Как видно из графика, на участке с расходом до 177 л/с характеристика трубопровода в случае удаления из него воздуха значительно отличается от трубопровода без удаления воздуха.

Удаление воздуха из системы трубопроводов. Вопрос удаления воздуха из трубопровода нужно решать на основании сопоставления требуемых напоров в обоих случаях. Решающую роль в этом вопросе будет играть место расположения наиболее высокой точки трубопровода. Если она находится в его начале, то основная часть трубопровода будет работать в самотечном режиме и не будет требовать дополнительных затрат энергии на перекачку стоков. Поэтому предусматривать удаление воздуха нет необходимости.

Если же самая высокая точка трубопровода будет находиться в конце трубопровода (рис. 4), то увеличение геометрической высоты подъема за счет образования «воздушного мешка» и срыва вакуума

может превысить снижение потерь напора на коротком концевом участке трассы. В результате требуемый напор увеличивается (см. рис. 3).

Таким образом, систему удаления воздуха необходимо предусматривать если:

$$H_{Г\max} - H_Г > S_{кон} Q^2,$$

где $S_{кон}$ – сопротивление участка трубопровода от самой верхней точки до приемной камеры, м/(л/с)^2; Q – расход, л/с.

Анализируя график на рисунке 3, можно сделать вывод, что с точки зрения минимальных требуемых напоров трубопровод, изображенный на рисунке 2, выгоднее эксплуатировать без удаления воздуха, а для трубопровода, показанного на рисунке 4 – с удалением воздуха.

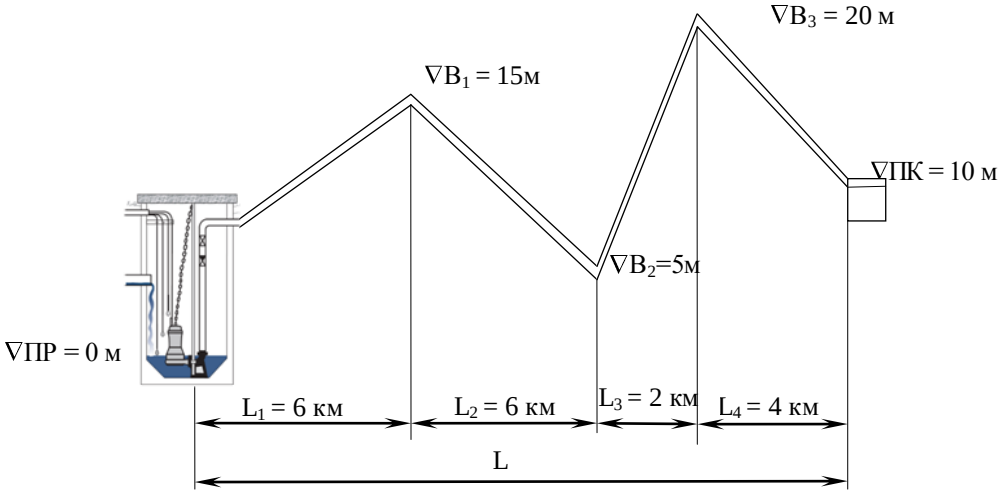

Рис. 4. Схема насосной станции с напорными трубопроводами, проложенными по переменной местности

Кроме того, как видно из рисунка 3, рабочие точки насосного оборудования для различных режимов работы могут находиться в различных точках его характеристики. Учитывая возможность выхода из строя систем удаления воздуха, необходимо предусмотреть возможность работы насосного оборудования и с воздухом в системе.

На устойчивую работу напорного трубопровода также оказывает влияние и наличие небольших подъемов трубопровода, где может скапливаться воздух при остановке насосного оборудования.

На рисунке 5 представлен экспериментальный график колебаний напора насоса при пуске после получасового простоя. Частое изменение напора насоса объясняется перемещением воздуха по ходу движения стоков от одной вершины трубопровода к другой.

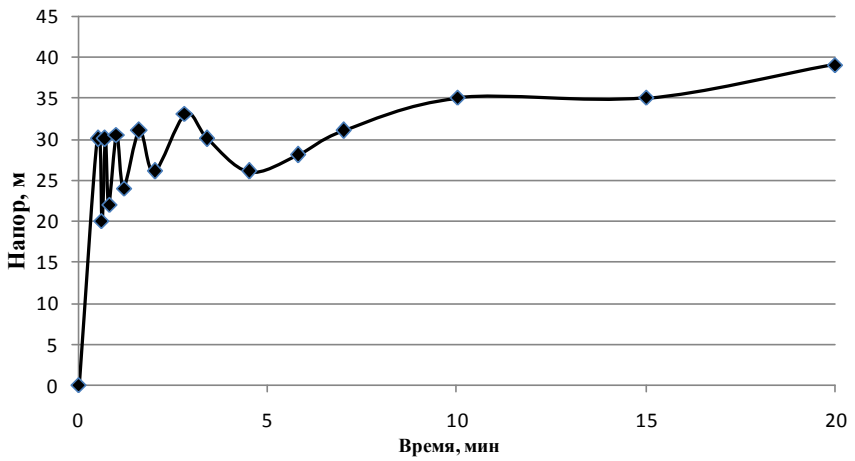

Рис. 5. График изменения напора при запуске насоса

Следует отметить, что возможность самотечной работы отдельных участков напорного трубопровода для диаметров до 200 мм представляется маловероятным, так как канализационные коллекторы проектируются с учетом поддержания самоочищающихся скоростей, значения которых приведены в таблице.

Минимальные самоочищающие скорости и соответствующие им гидравлические уклоны

Диаметры, мм	Скорости, м/с	Гидравлический уклон, м/км
200	0,7	4,6
300	0,8	3,3
400	0,8	2,1
500	0,9	2
600	1,0	1,9
800	1,0	1,3

Из таблицы видно, что чем меньше диаметр напорного трубопровода, тем больший уклон местности необходим для условий формирования самотечного движения.

Выводы

1. Наличие восходящих и нисходящих участков канализационного напорного трубопровода может приводить к резкому изменению геометрической высоты подъема при пуске насоса.
2. На нисходящих участках, проложенных с уклоном большим, чем гидравлический уклон, будет формироваться самотечный режим работы, что будет приводить к скачкообразному изменению характеристики трубопровода.
3. Необходимость установки систем удаления воздуха решается путем сравнения требуемых напоров насосной станции для различных вариантов работы канализационного коллектора.
4. При подборе насосного оборудования для трубопровода, проложенного по переменной местности, необходимо учитывать все возможные режимы работы, чтобы не допускать выхода из строя насоса или мотора и гарантировать их оптимальную работу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карасев, Б.В. Насосы и воздуходувные станции / Б.В. Карасев. – Минск: Выш. шк., 1990. – 327 с.
2. Карелин, В.Я. Насосы и насосные станции / В.Я. Карелин, А.В. Минаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986. – 320 с.
3. Яковлев, С.В. Водоотведение и очистка сточных вод / С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. – М.: АСВ, 2002. – 704 с.
4. Медведев, В.Ф. Гидравлика и гидравлические машины / В.Ф. Медведев. – Минск: Выш. шк., 1998. – 311 с.
5. Рекомендации по проектированию систем водоотведения с насосными установками: справ. пособие. – Dortmund: WILO AG, 2006. – 81 с.
6. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н.Н. Павловского. – М.: Стройиздат, 1987. – 154 с.

Поступила 27.11.2009