

С. Романчук, директор СКТБ «Турбулентность»
Донецкий национальный университет, г. Донецк, Украина
romanchuksm@rambler.ru

Закономерности и статистические модели режимов работы городских водораспределительных сетей

Установлены закономерности и разработаны статистические модели для описания режимов работы городских водораспределительных систем. Показано, что расчетные модели напорных характеристик для объектов водораспределения при автоматическом управлении давлениями на входе в участки сетей могут быть представлены простыми регрессионными зависимостями одного временного ряда от другого.

Ключевые слова: мониторинг, водораспределительные сети, режимы городских систем водоснабжения, базы данных, закономерности изменения технологических параметров, регрессионные модели

Введение

Сегодня более 70% объема использования пресной воды в Украине приходится на коммунальное хозяйство и питьевое водоснабжение населения. Наличие качественной питьевой воды в количестве, которое удовлетворяет основные нужды человека, является одним из основных условий сохранения здоровья людей и устойчивого развития страны [1]. Одной из наиболее актуальных проблем, которые стоят перед коммунальным хозяйством Украины, является проблема снижения энерго- и ресурсопотребления систем водоснабжения и водоотведения [2].

Современные системы водоснабжения и водоотведения городов являются сложными энергоемкими промышленными комплексами, имеющими развитые системы технологического мониторинга и управления режимами работы водораспределительным оборудованием и средствами водоподачи. Известно, что внедрение систем управления насосными станциями с промышленными контроллерами на основе использования частотно-регулируемых приводов позволяет снизить энергопотребление станций водоснабжения на 30 – 40%, уменьшить потери воды на 5 – 15% и сократить (до 40%) расходы на эксплуатацию и ремонт оборудования. Существует также множество технических решений, основанных на применении информационно-управляющих систем и систем мониторинга в области водораспределения, водоотведения и оценки качества питьевой воды [3–7]. В крупных городах распространены современные автоматизированные системы мониторинга и управления водоснабжением. Такие системы направлены на сбор информации для дальнейшего использования, анализа и выполнения прогнозов.

Автоматизированные системы мониторинга контролируют расходы воды на водопроводных узлах и подкачивающих станциях, уровни воды в резервуарах, давление в сетях, потребление электроэнергии, режимы использования насосного оборудования и запорной аппаратуры, параметры качества воды и т.д. Автоматическое управление осуществляется насосами, запорной аппаратурой, частотными преобразователями и т.д. Например, АСУ ТП водоснабжения крупных городов работают на основе современных систем связи и передачи информации, имеют развитые системы мониторинга и управления технологическими режимами [3–7]. Аппаратно-программные комплексы, поддерживающие работу таких систем, используют развитые информационные сети и значительные вычислительные мощности, ориентируются на применение SCADA-систем, профессионально ориентированное программное обеспечение систем автоматизации и широкую номенклатуру аппаратных средств. Оптимизация работы мощного насосного оборудования и водораспределительных сетей невозможна без создания современной информационно-аналитической системы мониторинга и управления водоснабжением города.

Базы данных и методы анализа технологической информации

В городе Донецке в течение 2004–2010 гг. ведутся работы по созданию эффективной системы мониторинга городской сети водоподачи и водораспределения [7, 8]. Созданная система мониторинга позволяет накапливать и анализировать значительные объемы технологической информации.

Например, в процессе развития подсистемы мониторинга режимов водоснабжения Киевского района г. Донецка на 35 объектах было установлено

279 различных измерительных устройств и средств мониторинга. В таблице 1 по результатам опытно-промышленной эксплуатации системы приведены основные сравнительные характеристики, позволяющие оценить уровень технологического развития подсистемы мониторинга АСУ ТП водоснабжения, общий объем накапливаемой информации и возможности системы в области реализации функций контроля технологических параметров.

Из анализа таблицы 1 видно, что возможности автоматизированной системы, связанные с развитием каналов и созданием контрольных точек мониторинга, достаточно велики. При этом объемы собираемых данных также весьма значительны (около $7 \cdot 10^6$ наблюдений в год). В настоящее время только по

Киевскому району города Донецка имеется база данных, содержащая более 40 млн. наблюдений. Это позволяет применить методы поиска системных закономерностей в накопленной базе данных.

Создание баз данных технологической информации позволит построить информационные модели системы водоснабжения района. В этом плане построение модели опытно-промышленного участка системы водоподачи Киевского района города является актуальной задачей, т.к. позволит в дальнейшем разработать по имеющимся данным мониторинга адаптивные алгоритмы для оценки работы систем водоснабжения. Такие алгоритмы дают возможность на локальном и центральном уровне системы вести непрерывную оценку эффективности водораспределения и экономичности работы насосного оборудования.

Таблица 1 – Характеристики и показатели системы мониторинга опытно-промышленной АСУ ТП водоснабжения Киевского района

№	Характеристики и показатели	Единица измерения	Базовые значения
1.	Площадь территории, где размещены объекты мониторинга и управления АСУ ТП	кв. км.	37
2.	Количество контрольных точек (объектов), в том числе:	шт.	35
	– водопроводных узлов		2
	– подкачивающих насосных станций		23
	– других объектов (колодцы, оборудование и т.д.)		10
3.	Количество средств мониторинга, в том числе	шт.	279
	– датчиков расхода		29
	– датчиков давления		70
	– датчиков электротехнических характеристик технологических устройств		120
	– других средств мониторинга и контроля		60
4.	Количество непрерывно наблюдаемых параметров	шт.	279
5.	Средняя частота измерений (по оценке интенсивности потоков данных на объектах)	изм./час	20
6.	Средняя частота передачи данных (по оценке интенсивности потоков данных на объектах)	раз/час	2
7.	Общий объем данных, накапливаемых АСУ ТП	изм./год	около $7 \cdot 10^6$

Формирование баз данных мониторинга режимов работы городских систем водоснабжения дает возможность применить методы интеллектуального анализа данных. Пока такие методы используются в АСУ ТП на предприятиях водоснабжения недостаточно. Однако наличие крупных баз данных, содержащих технологическую информацию, закономерно ставит вопрос о выборе методов Data mining для изучения постоянно растущих объемов информации.

Известно, что интеллектуальный анализ данных – позволяет выявить скрытые закономерности в больших объемах информации. Буквально несколько месяцев опытной эксплуатации АСУ ТП водоснабжения Киевского

района г. Донецка позволили накопить объем информации достаточный для использования методов Data mining. Данные методы дают возможность получать закономерности, определяющие формирование технологических режимов городских систем водоснабжения, за счет анализа временных рядов контролируемых параметров.

Преимуществом таких подходов является отказ от использования методов гидравлических и энергетических расчетов, которые требуют большого количества исходных данных, имеющих достаточно высокую погрешность и низкую достоверность. При этом на смену традиционным методам приходят адаптивные методы, когда простые зависимости с небольшим количеством

входных и выходных переменных получают путем обработки информации взятой из технологических баз данных.

Основной целью разработки моделей функционирования системы водоснабжения Киевского района г. Донецка является существенное снижение количества исходных данных, которые обладают значительной неопределенностью. Традиционные расчетные методики требуют задания многих параметров: диаметров трубопроводов, коэффициентов гидравлических сопротивлений участков, данных о перепадах высот и скоростных характеристиках сетей, данных о местных сопротивлениях и т.д. Вся эта информация применительно к длительно эксплуатирующимся системам водоснабжения обладает невысокой достоверностью и значительной неопределенностью.

Снижение количества исходных данных возможно путем удаления из расчетов наиболее неопределенных участков сетей и представления их моделями, описывающими напорные и расходные характеристики. Это позволяет с высокой достоверностью построить модель центральной части системы водоснабжения, которая охватывает сеть, где размещены основные насосные системы водораспределительных узлов и подкачивающих насосных станций, потребляющих основное количество энергии.

Однако, построение напорных характеристик объектов водоснабжения или участков водораспределительных сетей с элементами регулирования требует предварительного изучения имеющейся технологической информации. Не всегда аналитические модели, полученные для стационарных или квазистационарных гидравлических режимов, могут быть распространены на динамические режимы, которые наблюдаются в условиях автоматического регулирования работы систем.

Анализ водораспределительной сети опытного участка позволяет сделать вывод о необходимости построения различных моделей объектов, на основе которых в дальнейшем может быть осуществлен синтез моделей, охватывающих крупные участки водопроводной сети. Среди таких моделей следует выделить:

- модели подкачивающих насосных станций [8];
- модели простых участков водопроводной сети между двумя ближайшими контрольными точками;
- модели сложных участков сети, содержащих несколько контрольных точек и представляющих собой целые ветви сети.

Анализ информации накопленной в технологической базе данных водоснабжения Киевского района позволил сделать вывод, что расчетные модели объектов водоснабжения и водораспределения, определяющие напорные характеристики, могут быть заменены простыми стохастическими моделями временных рядов. Наиболее распространенными методами прогнозирования временных рядов являются [9-11]:

- метод авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего (метод АРСС) – построение параметрических моделей временных рядов;
- метод распределенных лагов – построение регрессии одного ряда на другой;
- методы сезонной (циклической) декомпозиции – построение аддитивной или мультипликативной модели ряда относительно тренда, циклической составляющей и нерегулярной случайной компоненты;
- экспоненциальное сглаживание – прогнозирование временных рядов сглаженных с экспоненциальными весами.

Будем использовать данные методы при поиске закономерностей в базах данных технологической информации предприятий водоснабжения

Статистические модели участков водораспределительных систем

Для построения моделей режимов работы водораспределительных сетей из базы данных технологической информации формировались выборки данных по различным участкам, включающим линии подачи воды различной протяженности. В процессе накопления массивов данных проводилось одновременное снятие значений давления воды в контрольных точках – на входе и выходе исследуемого участка. Выборки данных охватывали периоды времени не менее одного месяца, временные интервалы снятия данных выбирались равными 30 минут. Всего для исследования было выбрано около 40 участков водораспределительных сетей Киевского района города Донецка между различными подкачивающими насосными станциями (ПНС). Участки выбирались таким образом, чтобы между контрольными точками не было ПНС, насосы которых скачкообразно изменяют давление воды при подаче потребителям.

Построение моделей водоснабжения участков водораспределительных сетей будем основывать на применении гидравлических моделей с сосредоточенными параметрами и учете статистических закономерностей.

Определение напорных характеристик участков водораспределительных сетей при регулировании технологических режимов можно основывать на гидравлических моделях распределительных трубопроводов [12-14]. Известно, что зависимость напора от изменения расхода по длине распределительного трубопровода имеет вид [14]:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{l}{2 \cdot D \cdot g \cdot \omega^2} \left(Q_0^2 - Q_0 Q_p + \frac{Q_p^2}{3} \right) - \frac{a_*}{g \cdot \omega^2} \left(Q_0 Q_p - \frac{Q_p^2}{2} \right), \quad (1)$$

где Q_0, Q_p – расход в начале участка и путевой (раздаваемый потребителям на участке) расход; λ – коэффициент гидравлического сопротивления участка; D, ω – диаметр и сечение трубопроводов; g – ускорение свободного падения; a_* – некоторая константа, характерная для изучаемого участка.

Учитывая баланс расходов $Q_0 = Q_k + Q_p$, где Q_k – расход в конце участка (транзитный расход) получим уравнение (1) в виде:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{l}{6 \cdot D \cdot g \cdot \omega^2} \left(Q_0^2 + Q_0 Q_k + Q_k^2 \right) - \frac{a_*}{2 \cdot g \cdot \omega^2} \left(Q_0^2 - Q_k^2 \right), \quad (2)$$

Для протяженных участков распределительных трубопроводов вторым слагаемым в уравнении (2) пренебрегают. Учитывая также, что $\omega = \pi \times D^2 / 4$, получим зависимость для потери напора:

$$\Delta h = \frac{8 \cdot \lambda \cdot l}{3 \cdot g \cdot \pi^2 \cdot D^5} \left(Q_0^2 + Q_0 Q_k + Q_k^2 \right) = \frac{1}{3} S_0 \cdot l \cdot \left(Q_0^2 + Q_0 Q_k + Q_k^2 \right), \quad (3)$$

где $S_0 = \frac{8 \cdot \lambda}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5}$ – удельное сопротивление трубопровода, зависящее от ее диаметра D и гидравлического коэффициента сопротивления λ .

Из опытных данных [14] известно, что величина $q_p = \sqrt{Q_0^2 + Q_0 Q_k + Q_k^2}$, называемая расчетным расходом, приближенно может быть представлена в виде:

$$q_p = Q_k + \beta \cdot l \cdot q_0, \quad (4)$$

где q_0 – средняя удельная раздача воды на единице длины трубопровода; β – коэффициент, характерный для данного участка трубопровода ($0,5 < \beta < 0,58$).

Система автоматического управления ПНС и водопроводных узлов обеспечивает поддержание постоянного давления на выходе из насосных станций и тем самым стабилизирует в определенном диапазоне колебания расхода Q_0 . Кроме этого, определяемые при мониторинге расходы

воды Q_0, Q_k, Q_p , однозначно связаны балансовым уравнением вида $Q_0 = Q_k + Q_p$. Поэтому, учитывая уравнение (4), зависимость (3) может быть приближенно представлена через расход Q_k следующим образом:

$$\Delta h(t) = P_2(t) - P_1(t) = \alpha(S_0, l) \cdot Q_k^2(t), \quad (5)$$

где α – некоторый характерный для данного трубопровода коэффициент, который может определяться по данным мониторинга технологических параметров, $\alpha = \Delta h(t) / Q_k^2(t)$.

Таким образом, информационные базы данных, создаваемые при мониторинге режимов, предполагают сбор данных как минимум по трем технологическим показателям работы – давление воды на линии входа в участок водораспределительной сети, расход и давление воды на выходе из участка (в контрольной точке).

Так как расходы воды на контрольном участке обычно имеют явно выраженные корреляционные связи, то при решении практических задач выражение для потерь напора по длине длинного трубопровода можно представить в виде:

$$\Delta h = P_2(t) - P_1(t) = S_0 \cdot Q^2(t) \cdot l, \quad (6)$$

где $Q(t)$ – расход воды в некоторой контрольной точке системы мониторинга; l – длина трубопровода; $P_2(t), P_1(t)$ – давление воды на выходе и входе в участок трубопровода.

Для эксплуатируемых участков сетей трубопроводов с установившимися режимами расход воды будет определяться давлением воды на входе в трубопровод, поэтому зависимости изменения напора для участков сети можно искать по экспериментальным данным среди функций вида:

$$\Delta h = P_2(t) - P_1(t) = F[P_1(t)], \quad (7)$$

В результате исследований было установлено, что расчетные модели для участков трубопроводов системы водоснабжения, определяющие напорные характеристики, могут быть заменены простыми линейными регрессионными моделями одного ряда относительно другого с достаточно высокими коэффициентами корреляции вида:

$$\Delta h(t) = a \cdot P_1(t) + b. \quad (8)$$

Для примера на рис. 1,а показана характерная зависимость потери напора воды на участке от давления воды на входе в изучаемый участок, длина которого составляет 3,5 км.

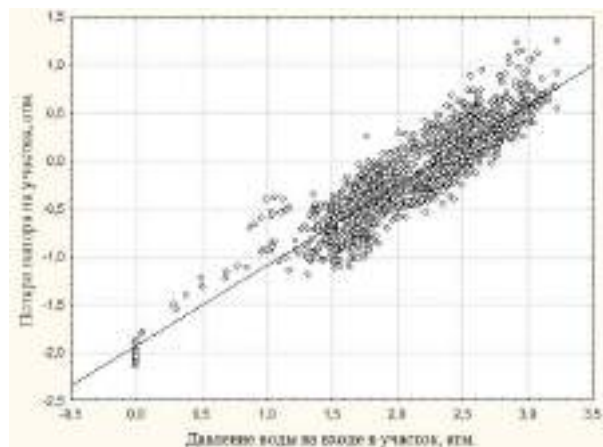
Таким образом, в регулируемых водораспределительных системах, где водопроводные узлы и подкачивающие насосные станции в течение суток обеспечивают жестко заданные технологические режимы, потери напора на конечных участках линейны относительно давления воды на входе в участок.

В таблице 2 приведены регрессионные модели для различных участков водораспределительных сетей.

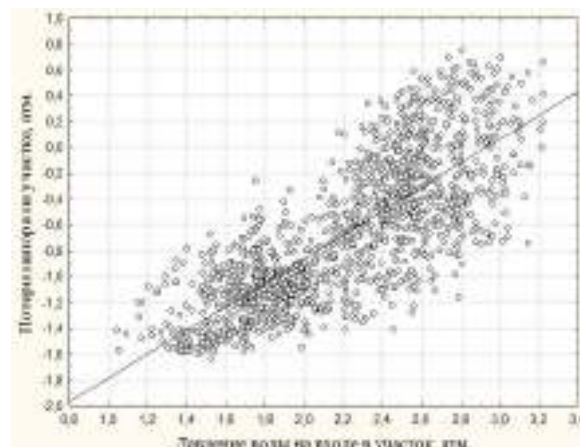
тельных сетей Киевского района г.Донецка, а на рис. 1,б – 2,а,б показаны характерные зависимости потери напора участков водораспределительных сетей от давления воды на входе в участок.

Из рисунка 1,б видно, что для очень длинных участков, например, квартал 268 – квартал 735, разброс точек существенно увеличивается и приводит к уменьшению коэффициента корреляции регрессионной зависимости. Длина участка сети между ПНС квартал 268 – квартал 735 составляет 4,2 км. Длина трубопровода квартал 268 – квартал 238

составляет 3,5 км и разброс точек меньше. В свою очередь, высокий коэффициент корреляции зависимости (8) для участка водораспределительной сети между ПНС квартал 268 – ул. Стратонавтов (рис. 2,б) объясняется относительно коротким трубопроводом длиной 2,3 км. Естественно, что разброс точек на рисунках определяется как длиной трубопроводов, так их состоянием, наличием отложений на стенках, что влечет за собой увеличение гидравлического сопротивления трубопроводов.



а)



б)

Рисунок 1 – Зависимость потери напора воды на участках водораспределительных сетей от давления воды на входе в участок: а) квартал 268 – квартал 196; б) квартал 268 – квартал 735

Таблица 2 - Параметры регрессионных моделей для различных участков водораспределительных сетей Киевского района г. Донецка

№	Наименование участка сети	Регрессионная модель	Коэффициент корреляции
1	Квартал 268 – Квартал 196	$\Delta h = -1,930 + 0,836 \cdot P_1(t)$	0,931
2	Квартал 268 – Квартал 238	$\Delta h = -0,550 + 0,711 \cdot P_1(t)$	0,923
3	Квартал 268 – Квартал 735	$\Delta h = -2,708 + 0,925 \cdot P_1(t)$	0,632
4	Квартал 268– п.Шахтерский-1	$\Delta h = -1,987 + 1,150 \cdot P_1(t)$	0,980
5	Квартал 268– Киевский-1	$\Delta h = -0,789 + 0,479 \cdot P_1(t)$	0,750
6	Квартал 268– Киевский-2	$\Delta h = -4,871 + 0,829 \cdot P_1(t)$	0,910
7	Квартал 268– Киевский-4	$\Delta h = -1,127 + 0,492 \cdot P_1(t)$	0,681
8	Квартал 268– Управление ЖД	$\Delta h = -0,805 + 0,733 \cdot P_1(t)$	0,695
9	Квартал 238– Киевский-2	$\Delta h = -4,723 + 0,559 \cdot P_1(t)$	0,643
10	Квартал 238– Киевский-4	$\Delta h = -1,852 + 0,679 \cdot P_1(t)$	0,621
11	Домостроитель– Квартал 735	$\Delta h = -2,764 + 0,974 \cdot P_1(t)$	0,795
12	Управление ЖД– Квартал 735	$\Delta h = -2,930 + 1,052 \cdot P_1(t)$	0,830

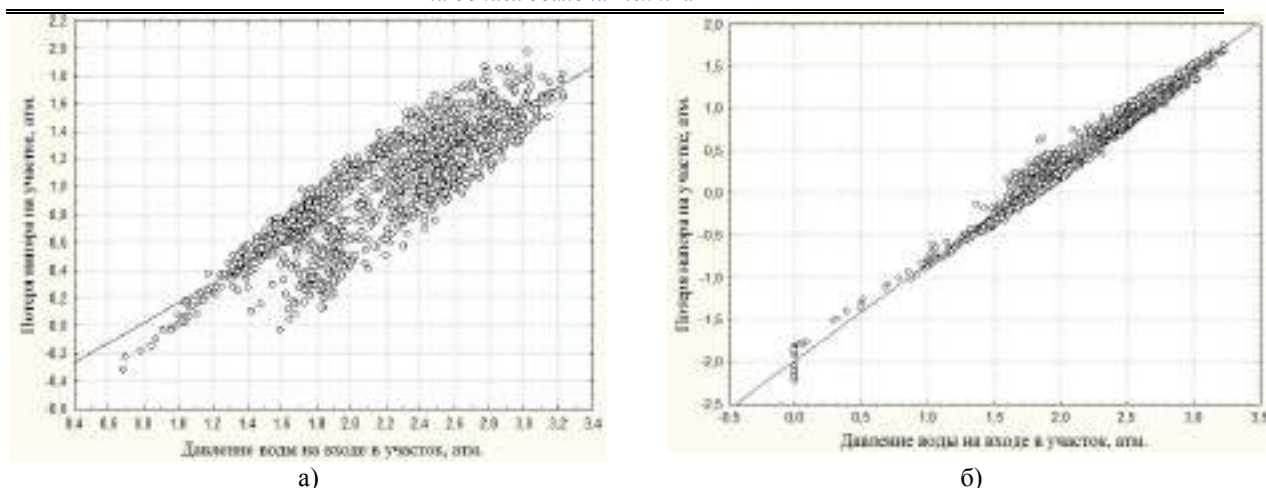


Рисунок 2 – Зависимость потери напора воды на участках водораспределительных сетей от давления воды на входе в участок: а) квартал 268 – квартал 238; б) квартал 268 – ул. Стратонавтов

Выводы

Создание технологических баз данных систем водоснабжения позволяет получить исходные данные для разработки статистических моделей, позволяющих описать режимы работы городских водораспределительных систем при автоматическом регулировании. При этом расчетные модели для объектов водораспределения, определяющие напорные характеристики, могут быть представлены простыми регрессионными зависимостями одного

временного ряда от другого. Преимуществом такого подхода является отказ от использования методов гидравлических и энергетических расчетов, которые требуют большого количества исходных данных, имеющих достаточно высокую погрешность и низкую достоверность. Таким образом, на основе данных мониторинга эксплуатационных режимов городской водораспределительной системы могут быть установлены закономерности изменения технологических параметров для протяженных участков сетей трубопроводов.

Список литературы

1. Про загальнодержавну програму «Питна вода України» на 2006 – 2020 роки [Текст]: постанова ВР України від 03 березня 2005 р. №2455-IV // Офіційний вісник України. – №13. – 2005. – Ст.655.
2. Про питну воду і питне водопостачання [Текст]: постанова ВР України від 10 січня 2002 р. №2918-III // Офіційний вісник України. – №6. – 2002. – Ст.223.
3. Пособие по проектированию автоматизации и диспетчеризации систем водоснабжения [Текст] / доп. к СНиП 2.04.02-84. – [утв. прик. Союзводоканал-НИИпроекта от 5.03.85]. – М.: Союзводоканал-НИИпроект, 1985. – 42с.
4. Масленников В. Создание автоматизированной диспетчерского системы управления водопроводной станцией [Текст] / В. Масленников // Системотехника, телемеханика и автоматизация. – Системная интеграция, коммунальное хозяйство, №1, 2002. – С. 20-25.
5. Рульнов А. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения [Текст] / А. Рульнов, К. Евстафьев. – М.: Изд. дом Инфра-М, 2007. – 205 с.
6. Возможности эффективного использования энергии и воды в муниципальных водохозяйственных системах [Текст] / Alliance to Save Energy, под общ. ред. Д. Е. Немцова. – Washington, 2002. – 144 с.
7. Романчук С.М. Автоматизированная система мониторинга и управления водоснабжением города Донецка // Вісник ДонНУ, Сер. А: Природничі науки.– 2009. – вип. № 2.– С. 133 – 141.
8. Романчук С.М. Мониторинг и анализ данных в процессе управления водоснабжением города Донецка // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2011. – № 1.– С. 133-141.
9. Боровиков В.П. Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows. [Текст]: учеб. пособ. / В.П. Боровиков, Г.И. Ивченко – М.: Финансы и статистика, 1999. – 384 с. – ISBN 5-279-01980-1.

10. Андерсен Т. Статистический анализ временных рядов [Текст] / Андерсен Т. – пер. с англ. И.Г. Журбенко, В. П. Носко, под ред. Ю. К. Беляева. – М. : Мир, 1976. – 756 с.
11. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: прогноз и управление [Текст] / Дж. Бокс, Г. Дженкинс; пер. с англ. А. Л. Левшина, под ред. В. Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1974. – 406 с. – (в 2-х томах, том 1).
12. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика [Текст] / Емцев Б.Т. – М.: Высш. шк., 1987. – 460 с.
13. Константинов Н.М. Гидравлика, гидрология и гидрометрия [Текст] / Константинов Н.М., Петров Н.А., Высоцкий Л.И. – [В 2 ч.]. – М.: Высш. шк., 1987. – Ч. I. – 304 с.; Ч. II. – 431 с.
14. Константинов Ю. М. Гидравлика [Текст] / Ю.М. Константинов. – К: Вища школа, 1988. – 398 с.

Надійшла до редакції 16.10.2012

C. РОМАНЧУК

Донецький національний університет, СКТБ
«Турбулентність»

S. ROMANCHUK

Donetsk National University,
"Turbulentnost"

Закономірності та статистичні моделі режимів роботи міських водорозподільних мереж

Встановлено закономірності та розроблено статистичні моделі для опису режимів роботи міських водорозподільних систем. Показано, що розрахункові моделі напірних характеристик для об'єктів водорозподілу при автоматичному управлінні тисками на вході в ділянки мереж можуть бути представлені простими регресійними залежностями одного часового ряду від іншого.

Ключові слова: моніторинг, водорозподільні мережі, режими міських систем водопостачання, бази даних, закономірності зміни технологічних параметрів, регресійні моделі

Patterns and Statistical Models of Urban Water Distribution Networks Operating Modes

Patterns were defined and statistical models were developed for describing urban water distribution systems operating modes. It is shown that computational models of pressure characteristics for water distribution objects with automatic pressure control at the inlet sections of the network can be represented by simple regression dependences of one time series on another.

Keywords: monitoring, water distribution networks, modes of urban water systems, databases, technological parameters change patterns, regression models