

С. Ю. ТЕПЛЫХ
Д. С. БОЧКОВ
М. В. ВЕСЕЛОВА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

MATHEMATICAL MODELING OF WATER SUPPLY AND WATER DISPOSAL SYSTEMS

Работа посвящена исследованию особенностей математического моделирования систем водоснабжения и водоотведения. Рассмотренные системы представляют собой сложные системы, состоящие из разветвленных трубопроводных сетей, сооружений, установок и оборудования. При этом работа всех элементов должна быть увязана друг с другом. Рассматриваемая в статье задача является очень сложной в силу наличия большого количества параметров и технологических процессов, происходящих в системах водоснабжения и водоотведения. Поэтому на практике для решения таких задач используются разные виды моделирования, в том числе математическое и потоковое.

The paper is devoted to the study of the features of mathematical modeling of water supply and sanitation systems. These systems are complex systems consisting of branched pipeline networks, structures, installations and equipment. In this case, the work of all elements must be linked to each other. This task is very difficult due to the presence of a large number of parameters and technological processes occurring in water supply and sanitation systems. Therefore, in practice, different types of modeling, including mathematical, are used to solve these problems.

Ключевые слова: математическое моделирование, водоснабжение и водоотведение, моделирование систем

Keywords: mathematical modeling, water supply and sanitation, systems modeling

Для всех систем главное условие – это их ограниченность. Безграничных систем нет, так как при этом утрачивается смысл их систематизации [1, с. 15].

Под системой имеется в виду совокупность взаимодействий и свойств материальных объектов и явлений в заданной или ограниченной области. Любая система характеризуется факторами, для описания которых используются переменные.

Виды систем и их определения приведены в таблице [1, с. 30].

Понятие «моделирование» означает исследование объектов познания с помощью их моделей [2, с. 63]:

– изучение и построение моделей явлений и предметов, реально существующих, среди которых неживые и живые системы, инженерные конструкции, разнообразные процессы (физические, химические, биологические, социальные);

Виды систем

Название системы	Сущность системы
Дискретная	Переменные изменяются скачкообразно, отражают «внешние» факторы и мало зависят от времени
Непрерывная	Переменные изменяются постоянно, отражают «внутренние» изменения и зависят от времени
Регулярная	Совокупность закономерных свойств и взаимодействий
Спорадическая	Совокупность случайных свойств и взаимодействий
Реальная	Совокупность всех материальных факторов
Абстрактная	Совокупность функций факторов

– построение и изучение моделей конструируемых объектов.

Единая классификация видов моделирования трудна в силу многозначности понятия «модель» в науке и технике. Ее можно построить с использованием разных оснований [3, с. 316]:

- по характеру моделей;
- по свойствам моделируемых объектов;
- по сферам приложения моделирования.

В связи с этим любая классификация методов моделирования будет неполной, при этом терминология в данной области опирается не столько на «строгие» правила, сколько на языковые, научные и практические традиции. И чаще всего определяется в рамках конкретного контекста и вне его никакого общепринятого значения не имеет.

Моделирование является формой отражения действительности. Разработанная модель полезна только в случае, когда она достаточно соответствует реальной системе. Чем совершеннее модель, тем ближе она к реальности [1, с. 16].

Моделирование используется для изучения реальных систем. В области водоснабжения и канализации под моделированием понимается моделирование сред, происходящих процессов, инженерных сооружений и оборудования на моделях.

Модель отличается от объектов моделирования своим масштабом или свойствами. В первом случае мы имеем реальные модели, во втором – мнимые модели. Модели в отличие от реальных систем имеют способность воспроизводить их состояние как в разных условиях, так и во времени. В результате открываются большие возможности в получении знаний о реальных системах [4, с. 259].

Главной целью моделирования является сокращение времени и затрат на то, чтобы получить достоверную информацию об объекте изучения. Что касается систем водоснабжения и канализации, то к практическим задачам, которые решаются методами моделирования, относятся следующие [5, с.102]:

- проведение экспертных оценок действующих систем водоснабжения и канализации;
- выполнение прогноза работы систем в новых условиях эксплуатации;
- управление работой систем водоснабжения и водоотведения и технологическими процессами, осуществляемыми в них;
- выполнение инженерно-технологического конструирования новых водопроводных и канализационных сооружений;
- проведение научного изучения водопроводных и водоотводящих систем и технологических процессов;

– осуществление поиска оптимальных технико-экономических решений.

Различают следующие виды моделирования. Предметным называется моделирование, когда исследование проводится на модели, которая воспроизводит основные физические, геометрические, динамические и функциональные характеристики «оригинала». Если модель и натура имеют одинаковую физическую природу, то это физическое моделирование. Знаковое моделирование требует применения схем, графиков, чертежей, графов, формул, слов и предложений. К знаковому моделированию принадлежит математическое или логико-математическое моделирование, осуществляющееся средствами языка математики и логики. Современная форма реализации математического моделирования – моделирование с использованием цифровых электронных вычислительных машин [6, с. 258].

Для решения технологических и теоретических задач разрабатываются модели. Последовательность их создания приведена на рис 1.

При математическом моделировании всегда стоит вопрос о практической применимости модели. Без ответа на данный вопрос задача о моделировании систем водоснабжения и водоотведения превратится в самоцель, что в конечном итоге поставит под сомнение прагматическую ценность всего выполняемого системного анализа [7, с. 87].



Рис. 1. Последовательность создания математической модели [1, с. 25]

Отбор варианта проектного решения связан с оценкой его эффективности. Это же относится и к выбору режима эксплуатации системы или блока. Влияние изменения внешних условий может оцениваться по зависимости от времени отклика системы или блока. Этим условиям отвечает детерминированная математическая модель [8, с. 36].

Работа с имитатором позволяет выбирать оптимальный режим эксплуатации или оптимальную конструкцию системы. Эксперименты с самим технологическим комплексом или его уменьшенной моделью экономически не оправданны. На их выполнение требуются значительные затраты времени.

Процесс алгоритмизации математической модели приведен на рис. 2.



Рис. 2. Процесс алгоритмизации математической модели [1, с. 29]

При выполнении алгоритмизации математической модели самым сложным является составление ее математического описания [9, с. 19].

Ни одна модель не способна отразить оригинал полностью и всесторонне. Чаще всего оказывается, что на практике целесообразно использовать менее «совершенную» модель, отражающую только отдельные черты оригинала и совсем не похожую на оригинал с других точек зрения. В ряде случаев разумно один оригинал моделировать при помощи разных моделей, которые не похожи одна на другую.

Модели, которые записываются уравнениями или системами уравнений, являются наиболее сложными [10, с. 11]. Их сложность зависит от числа уравнений и типа уравнений, которые применяются. Дифференциальные уравнения решаются сложнее алгебраических, а уравнения в частных производных – сложнее обыкновенных дифференциальных уравнений. Заметные сложности наблюдаются при переходе от линейных уравнений к нелинейным. Системы линейных алгебраических или обыкновенных дифференциальных уравнений можно решить аналитически в общем виде, конечно если этих уравнений не слишком много. Наличие нелинейности осложняет процедуру решения [11, с. 120].

Чаще всего сложность или простота математической модели связаны с тем, сколько в нее входит параметров, которые учитывают особенности объекта и отличают его от других объектов [1].

Современные пути к повышению эффективности систем водоснабжения и канализации базируются на конструкции математических моделей сетей, которые дают возможность производить расчеты в статических и динамических режимах. Расчеты всегда связаны с составлением и решением системы дифференциальных и алгебраических уравнений. Также их целесообразно решать численными методами [3, с. 84].

Если проводятся расчеты крупных промышленных систем водоснабжения, то наблюдается ограниченный объем информации по детализации элементов распределительных сетей и потребителей, которая была бы доступна для практического использования. Данной особенностью вызвана нужда в применении специальных способов макро моделирования, не требующих чрезмерной детализации характеристик сети, с достаточной для практического применения точностью [3, с. 125].

В фундаменте построения макро модели системы водоснабжения использованы следующие принципы [12, с. 29]:

- сетевые районы, которые имеют сложную схему сетевых соединений, содержащие большое количество относительно маломощных потребителей, рассматриваются как единый эквивалентный потребитель;
- потребители, подключенные напрямую к магистральной сети, рассматриваются как таковые;
- при необходимости наиболее тщательно рассмотрения параметров гидравлических режимов внутри отдельных сетевых районов может быть выполнен переход на следующий уровень макро модели, которая отражает состояние потребителей и вновь выделенных сетевых районов внутри сетевого района. При этом объект, являющийся потребителем на верхнем уровне макро модели, выступает в качестве источника для сетевого района.

Описанный выше подход позволяет строить тождественную математическую макро модель сложной распределенной производственной системы водоснабжения предприятия в условиях небольшого объема исходных данных. С учетом вышеизложенного подхода составление и решение гидравлических уравнений возможно осуществлять в среде моделирования и визуализации VisSim. Этот программный продукт имеет целый ряд возможностей, которые позволяют значительно упростить и ускорить процесс расчёта.

Построение математических моделей систем водоотведения, рассматриваемых в работе, основывается на особенности водно-ресурсных систем, заключающейся в существовании сети с потоками в ней воды и примесей, особенно применительно для водоотведения. С этими потоками связаны зависимости, характеризующие условия и качество функционирования водно-ресурсных и водоотводящих систем [13].

Потоковое моделирование водно-ресурсных и водоотводящих систем естественным образом связано с рассматриваемой ситуацией, что позволяет наглядно и логически обоснованно представить проблему и формализовать ее в виде «прозрачной» модели. Потоковое представление оптимизационной задачи, в отличие от геометрической картины нахождения экстремумов функций, дает возможность «наблюдать» картину в пространстве любого конечного числа измерений. Наглядность потокового формализма помогает пользователю видеть структуру задачи, выделять вносимые в модель упрощения, вскрывать взаимосвязи моделируемой системы, оценивать и совершенствовать модель [14].

Наглядность описания и простота структуры допустимого множества задачи, которой описывается потоковая модель, помогает анализировать задачу и строить эффективные методы ее решения в виде последовательного преобразования потоков, что дает возможность исследовать и решать задачи значительно большей размерности и с более сложным целевым функционалом, чем экстремальные задачи общего вида.

Решение задач линейного программирования, описанных как потоковые, не менее чем на два порядка более эффективно, чем решение тех же задач методами, не использующими потоковую структуру допустимого множества. Высокая эффективность потоковых задач позволяет использовать их как подзадачи в решении более общих задач, в которых потоковая составляющая является основной, но не единственной частью [15].

Потоковое моделирование проблемы обоснования параметров, режимов, гарантированных объемов и напоров, а также надежности сочетает традиционно используемое в водохозяйственном планировании для линейной схемы и формализма задач, постановка которых принадлежала Ф.А. Хитчкоку и Л.В. Кантовичу (1941–1942).

Потоковая интерпретация водно-ресурсных и водоотводящих систем укладывается в классическую схему транспортной задачи, соответствует пользованию без частичного возврата воды [16].

В моделях обоснования параметров, режимов, гарантированной отдачи водно-ресурсных и водоотводящих систем и ее надежности без явного учета качества воды присутствуют потоки одного типа. В данном случае развитие и выбор параметров и функционирование водно-ресурсных и водоотводящих систем, допускающих потоковое представление, описываются аналогичными моделями. Поэтому такие модели целесообразно рассматривать как представителей класса моделей с однородными потоками. Это дает возможность перенесения результатов, полученных в других потоковых системах, для выработки стратегий развития и тактики функционирования водно-ресурсных и водоотводящих систем. И наоборот, результаты теории управления водно-ресурсных и водоотводящих систем трактуются как принадлежащие этому классу и могут быть использованы в других системах, допускающих потоковую структуризацию [17].

Особенности потокового описания водно-ресурсных и водоотводящих систем, в котором учитывается использование водного потока и управление их качеством, выделяют модели функционирования, выбора параметров. В этом случае разнородные потоки, соответствующие различным примесям в водоотводящих системах, взаимодействуют, в результате чего соотношения между этими потоками на выходах не совпадают [18].

Потоковая структуризация, отображающая природу водно-ресурсных и водоотводящих систем, в которых существует сеть с потоками воды и примесей, является основой формализованного представления водохозяйственных проблем. Она явно или неявно присутствует практически во всех направлениях, связанных с этой тематикой.

Оптимизированные проблемы функционирования, выбора параметров и развития водно-ресурсных и водоотводящих систем естественно трактуются как проблемы оптимального управления потоковыми системами, что делает возможным использовать для их моделирования наглядное потоковое описание и эффективные потоковые методы. При этом в зависимости от характера учета структуры водно-ресурсных и водоотводящих систем, их свойств, нелинейных, динамических и стохастических особенностей протекающих процессов получают различные потоковые модели. Поэтому требуется с единых позиций рассмотреть потоковый подход к формализованному описанию этих проблем, исследовать свойства моделей и построить или адаптировать методы решения описывающих их задач [18].

Модели, в которых учитывается использование водных потоков и управление их качеством, включают в решение задач как частный случай описания водно-ресурсных и водоотводящих систем без учета качества. Данные модели не имеют аналогов в других системах и, отражая более общую ситуацию, являются более сложными.

Выводы. Целью статьи являлось исследование особенностей математического и потокового моделирования систем водоснабжения и водоотведения.

В процессе работы были решены следующие задачи:

- рассмотрены виды систем и методы моделирования;
- показан процесс математического моделирования систем;
- проанализировано создание математических моделей.

Были установлены основные понятия, применяемые в моделировании, среди них такие понятия, как системы, моделирование, модель, математическая и потоковая модели.

Установлены цели моделирования, при этом основной целью является сокращение времени и затрат на то, чтобы получить достоверную информацию об объекте изучения.

Выявлено, что практическими задачами, которые решаются методами моделирования в системах водоснабжения и водоотведения, являются следующие:

- проведение экспертных оценок действующих систем водоснабжения и водоотведения;
- выполнение прогноза работы систем в новых условиях эксплуатации;
- управление работой систем водоснабжения и водоотведения и технологическими процессами, осуществляемыми в них;
- выполнение инженерно-технологического конструирования новых водопроводных и водоотводящих сооружений;
- проведение научного изучения водопроводных и водоотводящих систем и технологических процессов;
- осуществление поиска оптимальных технико-экономических решений.

Отмечено, что современная форма реализации математического моделирования – это моделирование с использованием цифровых электронных вычислительных машин.

Установлено, что затраты времени на моделирование зависят от поставленной задачи, разработанной математической модели и количества параметров, использованных при составлении модели.

Модели, которые записываются уравнениями или системами уравнений, являются очень

сложными. Их сложность зависит от числа и типа применяемых уравнений. Дифференциальные уравнения решаются сложнее алгебраических, а уравнения в частных производных – сложнее обыкновенных дифференциальных уравнений.

В статье приведены примеры математического и потокового моделирования для элементов систем водоснабжения и водоотведения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев Е.В., Викулина В.Б., Викулин П.Д. Основы моделирования систем водоснабжения и водоотведения. М.: МГСУ, 2015. 128 с.
2. Моделирование, оптимизация и управление системами подачи и распределения воды: монография / М.Я. Панов, А.С. Левадный, В.И. Щербаков [и др.]; под общ. ред. М.Я. Панова; Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т, 2005. 489 с.
3. Калиткин Н.Н. Численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 592 с.
4. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М.: Мир, 1990. 660 с.
5. Пугачев Е.А. Технология эффективного водопользования в промышленности: монография. М.: АСВ, 2009. 176 с.
6. Романова Ю.Д. Информатика и информационные технологии. М.: Эксмо-Пресс, 2008. 304 с.
7. Сумароков С.В. Математическое моделирование систем водоснабжения. М.: Наука, 1983. 167 с.
8. Пугачев Е.А., Исаев В.Н. Экономика рационального водопользования / под ред. Е.А. Пугачева. М.: Издательство МИСИ-МГСУ, 2011. 284 с.
9. Замятина О. М. Моделирование систем. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. 204 с.
10. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, 1999. 799 с.
11. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
12. Абрамов Н.Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. М.: Стройиздат, 1985. 288 с.
13. Хранович И.Л. Управление водными ресурсами. Потоковые модели. М.: Научный мир, 2013. 390 с.
14. Богачева Н.Ю., Хранович И.Л., Чень Ци. Обоснование стратегий рационального использования водных ресурсов в условиях риска // Инженерная экология. 2000. № 6. С.2–21.
15. Глухих М.В. Обоснование водоохраных мероприятий в стохастических условиях с использованием математических моделей // VI Всероссийский гидрологический съезд. М.: Росгидромет, 2006. С. 221–226.
16. Готовцев А.В. Модификация системы Стритера-Фелпса с целью учета обратной связи между концентрацией кислорода и скоростью окисления органического вещества // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 89–98.

17. Данилов-Данильян В.И. Гарантированное пользование в рыночных условиях // Водные ресурсы. 2009. Т. 43. № 2. С. 228–239.

18. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Экологический вызов и устойчивое развитие. М: Прогресс-Традиция, 2000. 416 с.

REFERENCES

1. Alekseev E.V., Vikulina V.B., Vikulin P.D. *Osnovy modelirovaniya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [Basics of Modeling of Water Supply and Drainage Systems]. Moscow, MGSU, 2015. 128 p.

2. Panov M.Ya., Levadnyy A.S., Shcherbakov V.I. *Modelirovanie, optimizatsiya i upravlenie sistemami podachi i raspredeleniya vody* [Modeling, optimization and management of water supply and distribution systems]. Voronezh State University of Architecture and Construction, 2005. 489 p.

3. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. St. Petersburg, BHV–Petersburg, 2011. 592 p.

4. Oran E., Boris Dzh. *Chislennoe modelirovanie reagiruyushchikh potokov* [Numerical simulation of reacting flows]. Moscow, World, 1990. 660 p.

5. Pugachev E.A. *Tekhnologiya effektivnogo vodopol'zovaniya v promyshlennosti* [Industrial water efficiency technology]. Moscow, ASV, 2009. 176 p.

6. Romanova Yu.D. *Informatika i informatsionnyye tekhnologii* [Informatics and Information Technology]. Moscow, Eksmo-Press, 2008. 304 p.

7. Sumarokov S.V. *Matematicheskoe modelirovanie sistem vodosnabzheniya tekhnologii* [Mathematical modeling of water supply systems of technology]. Moscow, Science, 1983. 167 p.

8. Pugachev E.A., Isaev V.N. *Ekonomika ratsional'nogo vodopol'zovaniya* [Economics of water management]. Moscow, MISI-MGSU Publishing House, 2011. 284 p.

9. Zamyatina O. M. *Modelirovanie sistem* [Systems Modeling]. Tomsk, TPU Publishing House, 2009. 204 p.

10. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Mathematical physics equations]. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1999. 799 p.

11. Григорьев И.С., Мейлихон Е.З. *Fizicheskie velichiny* [Physical quantities]. Moscow, Energoatomizdat, 1991. 1232 p.

12. Abramov N.N. *Teoriya i metodika rascheta sistem podachi i raspredeleniya vody* [Theory and method of calculation of water supply and distribution systems]. Moscow, Stroyizdat, 1985. 288 p.

13. Khranovich I.L. *Upravlenie vodnymi resursami. Potokovyye modeli* [Water resources management. Streaming models]. Moscow, The Scientific World, 2013. 390 p.

14. Bogacheva N.Yu., Khranovich I.L., Chen' Tsi. Rationale for risk-based water management strategies. *Inzhenernaya ekologiya* [Engineering ecology], 2000, no.6. pp. 2–21. (In Russian)

15. Glukhikh M.V. Justification of water protection measures in stochastic conditions using mathemati-

cal models. VI *Vserossiyskiy gidrologicheskiy s'ezd* [VI All-Russian Hydrological Congress]. Moscow, Roshydromet, 2006. pp. 221–226. (In Russian)

16. Gotovtsev A.V. Modification of the Street-er-Phelps system to take into account the feedback between the oxygen concentration and the oxidation rate of organic matter. *Vodnye resursy* [Water resources], 2010, Vol. 37, no. 2. pp. 89–98. (In Russian)

17. Danilov-Daniľ'yan V.I. Guaranteed use in market conditions. *Vodnye resursy* [Water resources], 2009, Vol. 43, no. 2. pp. 228–239. (In Russian)

18. Danilov-Daniľ'yan V.I., Losev K.S. *Ekologicheskii vyzov i ustoychivoe razvitie* [Environmental challenge and sustainable development]. Moscow, Progress-Tradition, 2000. 416 p.

Об авторах:

ТЕПЛЫХ Светлана Юрьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: kafvv@mail.ru

TEPLYKH Svetlana Yu.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: kafvv@mail.ru

БОЧКОВ Дмитрий Сергеевич

магистрант кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: b.o.c.h.k.o.v@icloud.com

BOCHKOV Dmitriy S.

Master's Degree Student of Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: b.o.c.h.k.o.v@icloud.com

ВЕСЕЛОВА Мария Владимировна

магистрант кафедры водоснабжения и водоотведения Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: veselova63@inbox.ru

VESELOVA Mariya V.

Master's Degree Student of Water Supply and Wastewater Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: veselova63@inbox.ru

Для цитирования: Теплых С.Ю., Бочков Д.С., Веселова М.В. Математическое моделирование систем водоснабжения и водоотведения // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 2. С. 36–42. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.6.

For citation: Teplykh S.Yu., Bochkov D.S., Veselova M.V. Mathematical modeling of water supply and water disposal systems. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, Vol. 10, no. 2, Pp. 36–42. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.6.

Уважаемые читатели!

Научно-технический центр «Геотехника» с лабораторией «Механика грунтов» приглашает к сотрудничеству.

Основные направления деятельности Центра:

- инженерные изыскания
- обследования зданий и сооружений
- судебная экспертиза
- консультационные услуги

Руководитель *Мальцев Андрей Валентинович*

Контакты:

443001, Россия, г. Самара, Молодогвардейская, 194, корпус 13 (АСА СамГТУ), каб. 0304 Б тел. (846) 339-14-69 E-mail: geotechnika@ya.ru