



МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (GIS)

Muallif: Ernazarov Ilxom Ismatillayevich

Ilmiy rahbar: prof. Bo'riyev Eshmurod Sattorovich

Аннотация. В статье рассматриваются методы моделирования и оптимизации систем централизованного водоснабжения на основе геоинформационных технологий. Показано, что интеграция ГИС с гидравлическими моделями (EPANET, WaterGEMS) позволяет создать цифровую модель водопроводной сети, выявлять участки с недостаточным напором и повышенными потерями, а также обосновывать оптимальные варианты реконструкции. Предложена методика построения ГИС-модели водопроводной сети на примере районной сети с использованием открытого программного обеспечения QGIS и EPANET. Результаты моделирования подтверждают возможность снижения неучтённых потерь воды и энергозатрат насосных станций при оптимизации режимов работы сети.

Ключевые слова: водоснабжение, геоинформационные системы, ГИС, гидравлическое моделирование, EPANET, QGIS, оптимизация, водопроводная сеть, потери воды.

Введение

Обеспечение населения качественной питьевой водой является одной из приоритетных задач социально-экономического развития Республики Узбекистан. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы поставлена задача существенного повышения уровня охвата населения централизованным водоснабжением и снижения потерь воды в сетях.



Вместе с тем значительная часть водопроводных сетей страны эксплуатируется более 30–40 лет, характеризуется высокой степенью износа, а сведения о расположении и состоянии трубопроводов нередко хранятся в разрозненных бумажных схемах. В таких условиях принятие обоснованных решений по реконструкции и оптимизации режимов работы систем водоснабжения затруднено.

Геоинформационные технологии (ГИС) предоставляют инструменты для создания единой пространственной базы данных объектов водоснабжения, их визуализации и анализа, а в сочетании с гидравлическими моделями — для расчёта режимов работы сети и выбора оптимальных проектных решений. Целью настоящей работы является разработка методики моделирования и оптимизации систем водоснабжения на основе ГИС-технологий.

Материалы и методы

1. Структура ГИС-модели водопроводной сети. ГИС-модель системы водоснабжения представляет собой совокупность пространственных слоёв с атрибутивными данными:

- точечные объекты — водозаборные сооружения, насосные станции, резервуары, водонапорные башни, узлы сети, потребители, запорная арматура, пожарные гидранты;
- линейные объекты — трубопроводы с указанием диаметра, материала, года укладки, шероховатости;
- полигональные объекты — зоны обслуживания, кварталы застройки, границы давления (DMA-зоны);
- растровые данные — цифровая модель рельефа (ЦМР), спутниковые снимки, кадастровые планы.



Ключевым параметром для гидравлических расчётов являются геодезические отметки узлов, которые извлекаются из ЦМР (например, SRTM или ALOS) средствами ГИС автоматически.

2. Интеграция ГИС с гидравлической моделью. В работе использована связка открытого ПО QGIS и расчётного модуля EPANET 2.2 через модуль QWater (WaterNetwork). Технологическая последовательность включает:

1. оцифровку сети и наполнение атрибутивной базы данных в QGIS;
2. присвоение узлам отметок из ЦМР и расчётных водопотреблений на основе численности населения и нормативов;
3. экспорт модели в формат EPANET (.inp);
4. гидравлический расчёт в стационарном и продлённом (24-часовом) режимах;
5. импорт результатов (напоры, расходы, скорости, потери напора) обратно в ГИС для тематического картографирования.

3. Критерии и методы оптимизации. Задача оптимизации формулируется как минимизация целевой функции, включающей приведённые затраты на реконструкцию сети и эксплуатационные затраты на электроэнергию, при ограничениях:

- минимальный свободный напор в узлах — не менее нормативного (10 м на первый этаж плюс 4 м на каждый последующий);
- скорость движения воды в трубах — в диапазоне 0,5–1,5 м/с;
- максимальное давление — не более допустимого для данного материала труб.



Для поиска оптимальных диаметров трубопроводов и режимов работы насосов применялись методы последовательного перебора вариантов и эвристический генетический алгоритм, реализованный в среде Python с библиотекой WNTR (Water Network Tool for Resilience), использующей расчётное ядро EPANET.

Результаты и обсуждение

Апробация методики выполнена на модели районной водопроводной сети, включающей 1 водозабор, 2 насосные станции, 1 резервуар и около 180 расчётных участков общей протяжённостью ~42 км.

Диагностика существующего состояния. Гидравлический расчёт показал, что в часы максимального водопотребления в 17 % узлов, расположенных на возвышенных участках, свободный напор снижается ниже нормативного, тогда как в пониженной части сети давление превышает 60 м, что способствует росту утечек. Тематические карты, построенные в ГИС, наглядно локализовали проблемные зоны и участки с малыми скоростями потока (застойные зоны, ухудшающие качество воды).

Оптимизация. Рассмотрены три варианта мероприятий (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение вариантов оптимизации сети

№	Мероприятие	Доля узлов с нормативным напором	Расчётное снижение энергозатрат
0	Существующее состояние	83 %	—
1	Замена 6 «узких» участков с увеличением диаметра	96 %	4 %



№	Мероприятие	Доля узлов с нормативным напором	Расчётное снижение энергозатрат
2	Вариант 1 + зонирование сети с установкой регуляторов давления	100 %	9 %
3	Вариант 2 + частотное регулирование насосов	100 %	18 %

Наилучшие показатели по совокупности критериев обеспечивает вариант 3. Зонирование сети по давлению (DMA) в сочетании с регуляторами давления, по оценкам, позволяет снизить неучтённые потери воды на 12–15 %, поскольку объём утечек находится в степенной зависимости от избыточного давления.

Дополнительные возможности ГИС. Помимо гидравлических расчётов, ГИС-модель обеспечивает: планирование ремонтов по данным о возрасте и аварийности труб; оперативный поиск запорной арматуры при отключениях; расчёт числа отключаемых потребителей; интеграцию с системами SCADA и приборами учёта в перспективе создания «цифрового двойника» водоканала.

Выводы

1. Геоинформационные технологии позволяют перейти от разрозненной бумажной документации к единой цифровой пространственной модели системы водоснабжения, являющейся основой для гидравлического моделирования и управления сетью.



2. Связка QGIS — EPANET на базе открытого ПО является доступным для водоканалов Узбекистана инструментом, не требующим существенных затрат на лицензии.

3. Моделирование позволило выявить зоны дефицита и избытка напора и обосновать комплекс мероприятий, обеспечивающий нормативный напор у всех потребителей при снижении энергозатрат до 18 % и потерь воды на 12–15 %.

4. Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция ГИС-модели с данными SCADA и приборов учёта в режиме реального времени для калибровки модели и оперативного управления сетью.

Список литературы

1. Стратегия развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы. Указ Президента Республики Узбекистан от 28.01.2022 г. № УП-60.
2. Rossman L. A. EPANET 2 Users Manual. — Cincinnati: U.S. EPA, 2000.
3. Walski T. M., Chase D. V., Savic D. A. et al. Advanced Water Distribution Modeling and Management. — Waterbury: Haestad Press, 2003.
4. Klise K. A. et al. Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual. — Sandia National Laboratories, U.S. EPA, 2020.
5. Абрамов Н. Н. Водоснабжение. — М.: Стройиздат, 1982.
6. ҚМҚ 2.04.02-97. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. — Ташкент, 1997.
7. Лурье Ю. Е. Использование ГИС-технологий в системах водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. — 2015. — № 4.
8. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. — Open Source Geospatial Foundation Project, 2024.