



А.Г. Гудков, А.И. Безрукова
Вологодский государственный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО РАЙОНА ГОРОДА СЫКТЫВКАРА

Разработана электронная модель системы водоснабжения центрального района г. Сыктывкара. Показана возможность обеспечить необходимое давление водопотребителей без увеличения напора насосной станции. Предложена схема оптимизации водопроводной сети для сокращения энергозатрат насосной станции.

Система водоснабжения, электронная модель, Сыктывкар.

Наружные водопроводные сети являются важнейшей частью системы подачи и распределения воды (СПРВ), необходимой для водоснабжения населенных мест или промышленных объектов. Кроме сетей, в СПРВ входят водоподъемные сооружения (насосные станции) и регулирующие и запасные емкости (резервуары).

Согласно действующему законодательству [1], генеральные схемы водоснабжения для городов с населением численностью более 150 тысяч жителей должны включать в себя электронные модели (ЭМ) СПРВ. Такие модели отражают в цифровом актуальном виде информацию о структуре и технико-экономическом состоянии систем водоснабжения, а также обеспечивают проведение расчетов необходимых гидравлических параметров. ЭМ является современным инструментом для анализа функционирования всей системы СПРВ, а также планирования ее развития, оптимизации и реконструкции.

Различают два вида ЭМ – детализированную и укрупненную. Детализированная ЭМ включает исчерпывающую информацию о всей городской системе водоснабжения. При построении укрупненной модели используется более простая условная схема моделирования расходования воды из водопроводной сети через узловые отборы. Расстановка расчетных узловых отборов производится в местах пересечения магистральных трубопроводов, а также в местах расположения крупных потребителей воды.

Главным препятствием для построения детализированной ЭМ СПРВ является отсутствие статистически корректных данных о режимах потребления воды. Для обеспечения круглосуточного мониторинга необходима обширная сеть автоматических датчиков давления, расхода и уровня воды значительной части водопотребителей. Обеспечить такое наблюдение у большинства организаций, эксплуатирующих водопроводные сети и сооружения (водоканалов) на сегодняшний день нет возможности.

Поэтому на первом этапе построения ЭМ обычно принимается решение о построении ее укрупненной версии, которая позволяет оценить и проанализировать работу магистральных трубопроводов, а также

важнейших насосных станций и емкостей. В дальнейшем, исходя из анализа и апробации модели, а также плана развития города и его инфраструктуры, разрабатываются перспективные ЭМ [2, с. 133].

Целью настоящей работы является анализ работы водопроводной сети СПРВ центрального района г. Сыктывкара на основе укрупненной ЭМ, определение проблемных точек по результатам численного эксперимента и разработка предложений для улучшения работы СПРВ с помощью оптимизации магистральных линий сети.

Краткая характеристика СПРВ. Рассматриваемая СПРВ является крупнейшей частью общей централизованной схемы водоснабжения г. Сыктывкара, обслуживает территорию общей площадью около 1000 га (34 % от территории города с централизованным водоснабжением). Подачу воды в водопроводную сеть центральной части города обеспечивает водопроводная насосная станция третьего подъема ВНС-3 общей производительностью 28–29 тысяч м³/сут. Насосы ВНС-3 питаются из трех резервуаров общей емкостью 7000 м³, куда насосной станцией второго подъема из водоочистных сооружений города подается чистая вода. В 2014 году ВНС-3 прошла глубокую модернизацию с заменой насосного оборудования и установкой пропорционального (по подаче) частотно-регулируемого привода (ЧРП), систем автоматического регулирования и контроля давления и расхода. Установленное на ВНС-3 автоматическое измерительное оборудование позволило собрать и в дальнейшем использовать корректные данные о водопотреблении центрального района.

Водопроводные сети СПРВ выполнены из стальных, чугунных и полиэтиленовых труб с высокой степенью износа, номинальный диаметр трубопроводов не превышает 500 мм. Проведенная в июне 2020 года санация участка на Октябрьском проспекте магистрального водовода диаметром 500 мм и длиной 640 м методом гибкого комбинированного рукава показала ощутимое уменьшение утечек и снижение потребного напора ВНС-3 [3].

Построение ЭМ. Для построения ЭМ были использованы сведения о почасовом водопотреблении

центрального района за октябрь 2020 г., топографические данные района, а также схемы водопроводных сетей СПРВ, полученные от ОАО «Сыктывкарский Водоканал».

Из доступных на сегодняшний день программных комплексов – платформ для разработки ЭМ (Bentley, MIKE URBAN, Zulu, ИСИГР и др.) – был выбран EPANET 2 как наиболее подходящий по ряду параметров (стоимость, функциональные возможности, простота освоения и др.). Основой построения расчетной схемы ЭМ явилась подробная схема расположения водопроводных сетей СПРВ на рисунке 1, из которой были выделены магистральные водоводы и переемы. Общая длина сетей СПРВ составляет около 114 км.

При построении упрощенной схемы СПРВ были исключены все домовые присоединения и внутриквартальные сети. В итоге получена схема, представленная на рисунке 2, с трубопроводами диаметрами от 100 до 500 мм. Общая длина сетей составила примерно 32,9 км. В местах соединения трубопроводных участков назначены 54 узловые точки, выделен 71 участок (трубопровод между узлами).

Для определения значений условных отборов, связанных к узлам упрощенной схемы, были обработаны данные часовых и суточных подач ВНС-3 за октябрь 2020 г. и рассчитаны минимальные, средние и максимальные отборы для каждого узла расчетной схемы.

При реализации ЭМ СПРВ в программе EPANET были использованы объекты четырех типов: трубопроводы, узлы, насосы и резервуары. Для вычисления потерь напора по длине трубопровода Δh выбрана формула Шези-Маннинга:

$$\Delta h = 4,66 \frac{n^2}{d^{5,33}} L, \text{ м}, \quad (1)$$

где n – коэффициент шероховатости по Маннингу (n для стали и чугуна принят 0,012, для полиэтилена – 0,009); d – диаметр трубопровода, м; L – длина трубопровода, м.

Как показано в [2, с. 193–194], результаты расчетов потерь напора по зависимости (1) практически совпадают с широко распространенными в отечественной практике степенными формулами Ф.А. Шевелева.

Напорно-расходная характеристика параллельной работы трех насосов Grundfos NB 250-350/362, установленных на ВНС-3, моделировалась по аппроксимирующей степенной формуле (данные для регрессии взяты по каталогу насосов производителя):

$$H = 39,4 - 4,461 \cdot Q^{2,18} 10^{-7}, \text{ м}, \quad (2)$$

где H – напор насосов, м; Q – суммарная подача насосов, м³/ч.



Рис. 1. Общая схема сетей СПРВ центрального района



Рис. 2. Упрощенная расчетная схема СПРВ

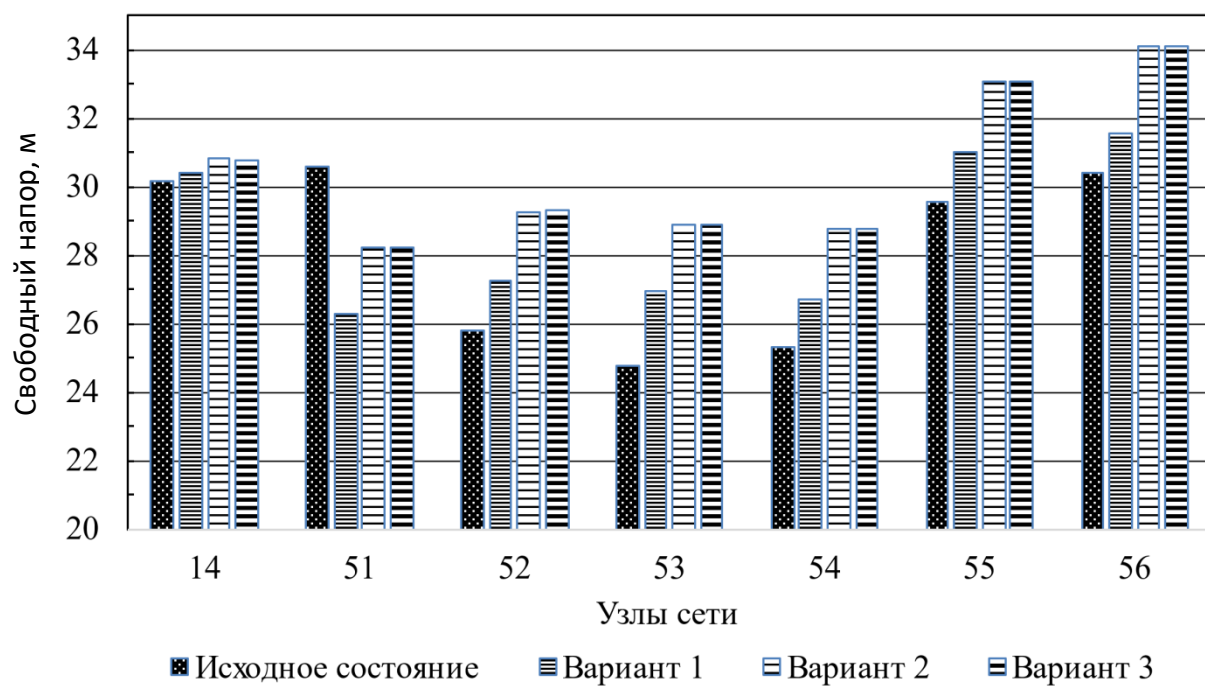


Рис. 3. Свободные напоры в 7-ми узлах сети СПРВ

Методика и результаты моделирования. Целью моделирования было определение давления (свободного или пьезометрического напора) во всех узлах СПРВ, а также удельных потерь напора, расходов и скоростей течения в трубопроводах СПРВ при известных узловых отборах. Рассчитанные значения анализировались, принималось решение о выборе направления оптимизации, изменялась конфигурация сети и материалы труб. Главными критериями оптимизации были обеспечение необходимого свободного напора для абонентов во всех узлах СПРВ, а также минимизация стоимости и продолжительности работ по реконструкции.

Для этого была проведена серия вычислительных экспериментов на ЭМ в программе EPANET при исходном состоянии входящих в СПРВ трубопроводных сетей и ВНС-3, а также по трем вариантам реконструкции сетей. Все вычисления были проведены для случая среднего за сутки водопотребления абонентами сети.

Моделирование при исходном состоянии СПРВ. Рассчитанные свободные напоры по 7 узлам СПРВ с наименьшими значениями приведены на графике «Исходное состояние» рисунка 3. Анализ полученных результатов показал, что в трех узлах – 52, 53, 54 – наблюдается давление (напор), меньше минимально

допустимого для жилых зданий в пять этажей (которое по строительным правилам [4] составляет 26 м). Для поддержания необходимого давления без реконструкции сетей требуется увеличить напор насосов на ВНС-3. Так как ВНС-3 оснащена насосными агрегатами с ЧРП, был подобран коэффициент увеличения частоты вращения рабочего колеса насосов, обеспечивающий минимальное давление, равный 1,02. При этом создаваемый напор ВНС-3 возрастает с 37,12 до 38,81 м. Такое решение не является рациональным, т.к. приводит к увеличению потребляемой ВНС-3 мощности и электроэнергии. Другим решением проблемы недостаточного давления является реконструкция отдельных и прокладка новых участков водопроводной сети СПРВ.

После анализа топологии сети и удельных потерь напора на ее участках было предложено три варианта оптимизации, которые рассмотрены ниже:

- прокладка трубопровода-перемычки между узлами 51–53;
 - реконструкция трубопровода на участке между узлами 56–57;
 - реконструкция трубопровода между узлами 4–5.
- На схеме сети (рис. 4) показаны места расположения реконструируемых участков и перемычки.

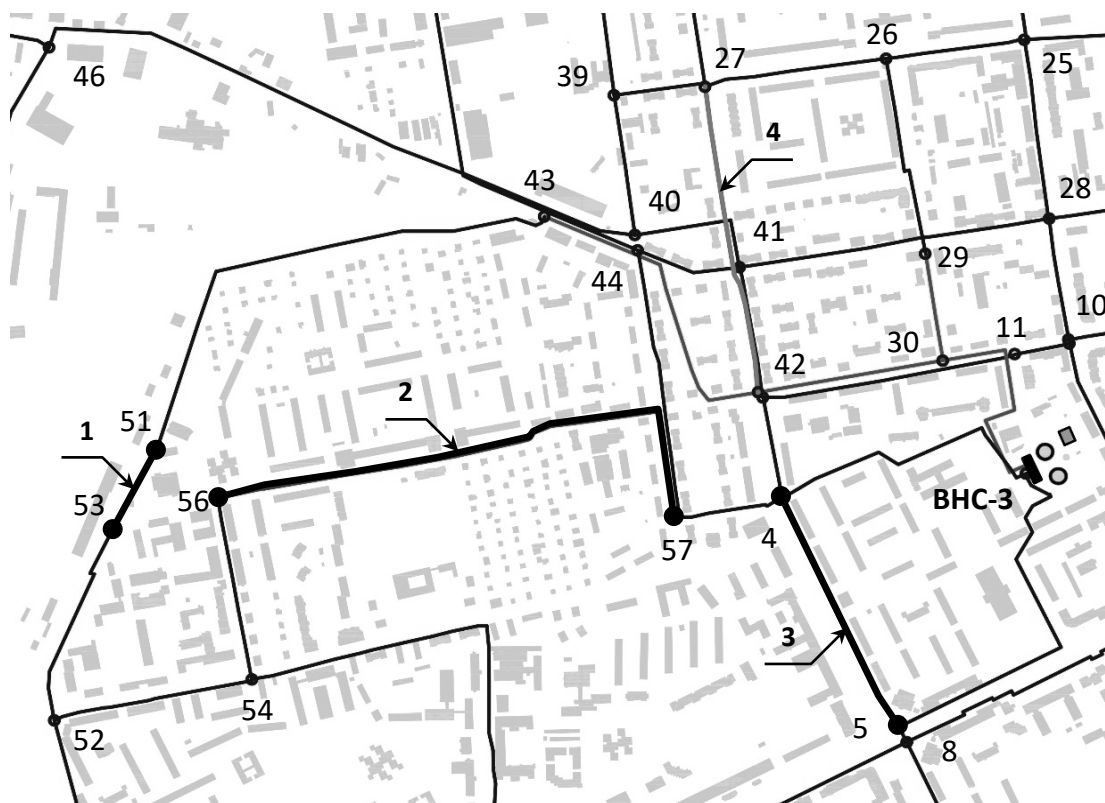


Рис. 4. Предлагаемые участки сети для оптимизации СПРВ
1 – перемычка 51–53; 2 – участок 56–57; 3 – участок 4–5;
4 – обновленный ранее участок 42–27

Вариант 1 – прокладка трубопровода-перемычки 51–53. Новый участок из полиэтиленовых труб диаметром 110 мм имеет длину 92 м (коэффициент шероховатости n для формулы (1) составляет 0,009). Моделирование узловых давлений в этом варианте показало, что после соединения узлов 51 и 53 перемычкой значительно увеличиваются свободные напоры в узлах 52, 53, 54 – «Вариант 1» на рисунке 3. Наименьшее значение напора в узле 51 составляет 26,28 м, что больше необходимого (26 м).

Вариант 2 – реконструкция участка 56–57 является дополнительным мероприятием к варианту 1 и предполагает замену старого стального трубопровода длиной 944 м номинальным диаметром 159 мм на полимерный трубопровод ПНД такого же размера, но с меньшим коэффициентом шероховатости. Результаты моделирования представлены на диаграмме «Вариант 2» рисунка 3. Наименьший свободный напор в узле 51 увеличивается до 28,21 м.

Вариант 3 – реконструкция участка 4–5. Для этого вариант 2 предлагается дополнить обновлением ветхого стального магистрального водовода диаметром 426 мм и длиной 443 м, который является продолжением уже санированного трубопровода на участке 42–27. Анализ результатов моделирования («Вариант 3» рисунка 3) показал, что давления в узлах изменились незначительно, поэтому такой вариант можно вынести на второй этап реконструкции сетей СПРВ.

Созданный «запас» превышения свободного напора в узле 51 позволяет сократить потребный напор, создаваемый насосами ВНС-3, до значения 34,11 м. Для этого можно уменьшить частоту вращения рабочего колеса каждого насоса до уровня 97 % от номинального режима. Наименьшее давление в узле 51 составит 26 м. Максимальный напор во всех трех вариантах оптимизации (56,14 м, узел 47) не превышает допустимого значения 60 м, установленного для наружной сети хозяйственно-питьевого водопровода [4].

Предполагаемое месячное уменьшение потребляемой электроэнергии $\Delta \mathcal{E}$ на ВНС-3 после внедрения мероприятий по варианту 3 составляет:

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{0,00272 \cdot Q_{\text{мес}} \cdot \Delta H}{\eta_n \eta_o} = \frac{0,00272 \cdot 914\,964 \cdot 4,7}{0,75 \cdot 0,92} = 16\,952 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{мес}}$ – суммарная подача насосов ВНС-3 за месяц (914 964 м³); ΔH – среднее за сутки уменьшение напора насосов (равное 38,81 – 34,11 = 4,7 м); 0,00272 – удельный расход энергии на подъем 1 м³ воды на 1 м, кВт;

η_n – КПД насоса, принимается равным 0,75; η_o – КПД двигателя, равное 0,92.

Перспективными вопросами, которые нуждаются в дальнейшей разработке, являются: калибровка ЭМ СПРВ, ее дополнительная доработка и детализация, а также внедрение в практику управления и оперативного контроля за работой системы водоснабжения города.

В данной работе получены следующие результаты:

- разработана упрощенная ЭМ СПРВ центрального района г. Сыктывкара, которая позволила выявить водопотребителей, для которых не обеспечивается минимальный свободный напор;

- по результатам проведенного моделирования и серии вычислительных экспериментов показана возможность обеспечить требуемое давление у самых неблагоприятно расположенных водопотребителей района без увеличения напора насосной станции;

- обоснована и предложена схема реконструкции трех участков водопроводной сети, которая в итоге сокращает потребный напор на ВНС-3 и затраты на электроэнергию.

Литература

1. О схемах водоснабжения и водоотведения: Постановление Правительства РФ от 5 сентября 2013 года № 782 (с изменениями на 22 мая 2020 года). – Текст электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 14.07.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Гудков, А. Г. Моделирование наружных сетей водоснабжения и водоотведения: монография / А. Г. Гудков, М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов. – Вологда : ВоГУ, 2020. – 230 с.
3. Безрукова, А. И. Исследование влияния санации водовода на работу насосной станции / А. И. Безрукова; научный руководитель: А. Г. Гудков // Молодые исследователи – регионам : материалы Международной научной конференции (Вологда, 20–21 апреля 2021 г.) : в 3 т. / [Министерство науки и высшего образования Российской Федерации и др. ; главный редактор С. Ф. Митенева]. – Том 1. – Вологда : ВоГУ, 2021. – С. 350–352.
4. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84* (с Изменениями № 1–5) : введен 26.06.2019. – Текст : электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 14.07.2021). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

A.G. Gudkov, A.I. Bezrukova
Vologda State University

MODELING AND OPTIMIZATION OF WATER DISTRIBUTION NETWORK FOR CENTRAL DISTRICT IN SYKTYVKAR

An electronic model of the water supply system in the central district of Syktvykar has been developed. It is shown that it is possible to provide the required pressure for water consumers without increasing the pumping station head. A scheme for optimizing the water supply network to reduce the energy consumption of a pumping station is proposed.

Water supply system, electronic model, Syktvykar.