

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ

О.Г. Примин, Г.Н. Громов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, РОССИЯ

АО «МосводоканалНИИпроект», г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: Разработка гидравлической модели регулируется в соответствии с российским законодательством. Однако, законодательные акты не содержат пояснений относительно методологии и уровня детализации гидравлической модели, а также требований для достаточного уровня калибровки модели. В настоящей статье представлена методология внедрения гидравлической модели для систем водоснабжения.

Ключевые слова: система водоснабжения, электронная модель, реализация

HYDRAULIC CALCULATIONS IMPROVEMENT OF WATER SUPPLY SYSTEMS BY USING ELECTRONIC MODELS

Oleg G. Primin, Grigory N. Gromov

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

JSC «MosvodokanalNIIProekt», Moscow, RUSSIA

Abstract: Development of hydraulic model is regulated according to Russian legislation acts. However, these legislation acts do not contain explanations regarding the methodology and detail level of hydraulic model, as well as requirements for sufficient level of model calibration. This paper presents hydraulic model implementation methodology for water supply systems.

Keywords: water supply system, electronic model, realization

1. ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть населения городов и поселений России обеспечена питьевой водой гарантированного качества (хотя бы по 50 параметрам). Однако, большая часть населения потребляет воду, качество которой не гарантировано, причем десятки миллионов человек используют природную воду без предварительной очистки.

Для поэтапной реализации этой задачи и в целях определения долгосрочной перспективы развития систем водоснабжения и водоотведения городов и поселений России, а также экономического стимулирования правитель-

ством РФ утвержден и введен в действие Федеральный закон от 7 декабря 2011 г. № 416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении» [1]. На основании этого закона развитие централизованных систем водоснабжения и водоотведения городов и поселений России осуществляется только в соответствии с Генеральными схемами этих систем [1]. В составе схемы необходимо разработать электронную модель централизованной системы водоснабжения и водоотведения города. Значительный объем статистической и эксплуатационной информации, сложная конфигурация и структура систем водоснабжения и водоотведения, неопределенность спроса на

воду потребовали применения информационных технологий для оценки и анализа функционирования этих систем и оптимизации их работы. В статье приведены направления совершенствования гидравлических расчетов систем водоснабжения с использованием электронных моделей.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми законодательством России, развитие водного хозяйства и инженерной инфраструктуры городов и населенных пунктов необходимо осуществлять в соответствии с проектами генеральных схем водоснабжения и водоотведения. Проекты схем разрабатываются в соответствии с документами территориального планирования города и основываются на разработке проектных решений, позволяющих определить инженерные решения и требуемые капитальные вложения

При численности населения города более 150 тыс. человек данные схемы обязательно должны включать в себя электронные модели систем водоснабжения и водоотведения.

Электронная модель системы водоснабжения – это геоинформационная система (ГИС), которая отражает в электронном виде актуальную информацию о структуре и технико-экономическом состоянии систем, а также обеспечивает проведение гидравлических расчетов. Электронная модель является инструментом анализа работы системы водоснабжения, а также позволяет моделировать ее реконструкцию и перспективное её развитие.

Стоит отметить, что в соответствии с «Правилами разработки и утверждения схем водоснабжения и водоотведения» [2], регламентируются требования к разработке электронной модели. Однако эти требования относятся к ее содержанию и программному обеспечению и не содержат в себе разъяснений в части методики и степени детализации модели, а также требований к сходимости электронной модели с фактическими показателями работы системы.

На текущий момент для реализации электронных моделей можно использовать различные программные комплексы (Bentley, MIKE

URBAN, Zulu, ИСИГР, Citi Com и др. [3-7]). В Российской Федерации наиболее популярными являются отечественные программные продукты, это объясняется небольшой ценой по сравнению с рассмотренными программными комплексами и достаточным набором функций согласно «Правилам разработки и утверждения схем водоснабжения и водоотведения» [2]. Однако стоит отметить, что отечественные программные комплексы уступают иностранным программным продуктам в ряде функциональных возможностей, в том числе в ряде функциональных возможностей, необходимых для построения электронной модели.

Институт «МосводоканалНИИпроект» успешно реализовал электронные модели систем водоснабжения таких городов, как: Уфа, Иркутск, Пенза, Оренбург, Тюмень, Салават, Минск. В данной работе представлен опыт разработки и алгоритм построения электронной модели системы водоснабжения.

2. ПОСТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Построение электронной модели предусматривает следующие этапы:

1. Построение расчетной схемы.
2. Определение расходной характеристики модели.
3. Калибровка модели.

При этом к основным видам данных относятся:

1. Топографические данные по трубопроводам и сооружениям сети.
2. Данные об оборудовании сооружений сети.
3. Статистические данные работы системы водоснабжения.

В практике различают 2 вида моделей: детализированная и укрупненная электронные модели. Детализированная электронная модель системы водоснабжения города вклю-

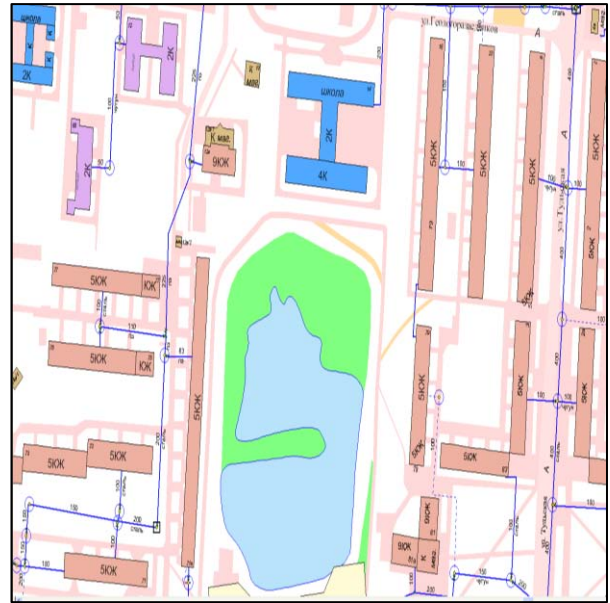
чает в себя всю информацию о системе водоснабжения. При построении укрупнённой модели используется условная схема водоотбора.

Условная схема водоотбора предполагает отбор воды из сети путем нефиксированных узловых отборов. Расстановка расчетных узло-

вых отборов производится в местах пересечения магистральных трубопроводов, а также в местах сосредоточенного отбора промышленными предприятиями и других крупных потребителей воды. Различие между детализированной и укрупненной электронными моделями представлено на рис. 1.



Расчётная схема укрупненной электронной модели



Расчётная схема детализированной электронной модели

Рисунок 1. Примеры расчётных схем детализированной и укрупненной электронных моделей.

Укрупненная электронная модель отличается меньшей степенью сходимости в сравнении с детализированной моделью, но, в свою очередь, также отличается на порядок меньшим объемом необходимых исходных данных и сроком её реализации.

После выбора типа и построения расчетной схемы определяется расходная характеристика модели, которая основывается на анализе статистики подачи насосных станций второго подъема. На основе анализа определяется максимальный день и максимальный час водоподдачи. Далее формируется балансовая схема системы, которая включает в себя

зоны, а также подзоны системы водоснабжения.

На основе балансовой схемы гидравлический расчёт системы водоснабжения может быть выполнен на расчётный час или проведено 24-ёх часовое моделирование системы. Стоит отметить, что 24-ёх часовое моделирование системы требует построения 24 балансовых схем соответственно.

При построении укрупненных электронных моделей необходим расчёт расхода нефиксированных узловых отборов. Анализ российских программных комплексов показал отсутствие таких функций. В связи с этим, АО

«МосводоканалНИИпроект» разработал алгоритм расчёта нефиксированных узловых отборов, который применим к программному обеспечению «Zulu». Алгоритм реализован на языке Visual Basic for Application (VBA) с использованием таблиц Excel. Структура алгоритма включает в себя:

1. Выгрузка базы данных ПО «Zulu» (предварительно узловые отборы нумеруются).
2. Формирование матрицы инцидентности.
3. Занесение данных по расходам зон и подзон системы водоснабжения.
4. Расчёт нефиксированных узловых отборов.
5. Загрузка результатов расчёта в базу данных «потребитель» ПО «Zulu».

Разработанный алгоритм расчёта расходов нефиксированных узловых отборов был апробирован и внедрен при разработке укрупненной модели водоснабжения города Минска.

Для объективной оценки влияния перспективных мероприятий, направленных на улучшение работы сети, а также развитие системы водоснабжения города, необходимо моделирование с использованием адекватной электронной модели. Адекватность электронной модели достигается путем её калибровки.

Основной целью калибровки электронной модели сети водоснабжения является соблюдение моделью замеренных характеристик реальной системы водоснабжения. С математической точки зрения процесс калибровки гидравлической модели водоснабжения заключается в минимизации целевой функции E :

$$E = \sum_{i=1}^P w_h (h_i^m - h_i)^2 + \sum_{i=1}^Q w_q (q_i^m - h_i)^2, \quad (1)$$

где P и Q являются измеряемыми значениями давления и расхода; h_i^m - измеряемый напор в узле i ; h_i - расчетный напор в узле i ; q_i^m - измеряемый расход в i трубе; q_i - расчетный расход в i трубе.

На текущий момент во всемирно известных программных продуктах Mike Urban, Bentley

используются неявные (оптимизационные) калибровочные модели. Неявные калибровочные модели основываются на решении оптимизационной проблемы (уравнение 1). Для решения данной задачи в программных продуктах Mike Urban, Bentley используется сложный генетический алгоритм [8-9].

Анализ российских программных продуктов показал отсутствие функции алгоритмизированной калибровки. В связи с этим, АО «МосводоканалНИИпроект» разработал алгоритм автоматической калибровки электронной модели для российского программного обеспечения «Zulu» на основе генетического алгоритма. Алгоритм реализован на языке Visual Basic for Application (VBA) с использованием таблиц Excel и библиотеки ActiveX компонентов «ZuluNetTools».

Несмотря на высокую производительность генетического алгоритма, при задании большого количества неизвестных, время работы достаточно высоко для детализированных электронных моделей. Поэтому в руководстве пользователя Mike Urban [8], а также в [10] предложена предварительная группировка трубопроводов по шероховатости или другим характеристикам. Для связи материала, года прокладки и шероховатости трубопровода в работе [11] была предложена следующая формула:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\max} - (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) \left[\frac{(t_{\max} - t_i)}{(t_{\max} - t_{\min})} \right]^b, \quad (2)$$

где ε_i – шероховатость для трубы i , мм; ε_{\min} и ε_{\max} – минимальные и максимальные значения шероховатости, которые соответствуют минимальному и максимальному возрастам труб, мм; t_{\min} и t_{\max} – минимальный и максимальный возрасты трубопроводов в группе, год.

На основе формулы 2 АО «МосводоканалНИИпроект» разработал алгоритм калибровки, реализованный на языке Visual Basic for Application (VBA) с использованием таблиц Excel и библиотеки ActiveX компонентов «ZuluNetTools». Алгоритм применим к программному обеспечению Zulu.

Структура работы алгоритма включает в себя:

1. В качестве исходных данных задаётся диапазон максимальных шероховатостей, соответствующий максимальному возрасту трубопровода.
2. Используя значения из заданного диапазона, рассчитываются значения шероховатости каждого трубопровода.
3. Данные экспортируются в базу данных Zulu и производится гидравлический расчёт.

Используя формулу 1, оценивается сходимость модели при заданном значении максимальной шероховатости. На основе полученных значений функции E формируется поверхность, по которой пользователь может определить оптимальное соотношение между максимальными значениями шероховатостей трубопроводов и сходимостью модели.

3. ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Одними из последних работ, выполненных АО «МосводоканалНИИпроект», являлись: разработка укрупненной электронной модели города Минска и калибровка детализированной модели города Салават.

Построение электронной модели системы водоснабжения города Минска основывалось на условной схеме водоотбора, которая предполагала фиктивные и сосредоточенные узловые отборы.

В модель были включены основные магистральные водоводы системы с диаметром более 300 мм. Расстановка сосредоточенных отборов производилась в местах отбора воды крупными потребителями (промышленные предприятия РПНС и ЛПНС г. Минска). Расстановка фиктивных узловых отборов в местах пересечения магистральных водоводов. В модель было внесено 4800 элементов, включая: 15 насосных станций, 694 потребителя. Крупные потребители воды в электронной модели системы водоснабжения г. Мин-

ска учитывались как сосредоточенные отборы. Для этого проводился анализ опросных листов промышленных предприятий, также анализировалась статистика потребления воды районных повысительных насосных станций и локальных повысительных насосных станций). При расчёте расхода повысительных насосных станций учитывался коэффициент неравномерности, полученный на основании распределения суточных расходов в течение года.

Калибровка модели была произведена на основании фактических показаний свободного напора в контрольных точках (100 точек). Суммарная относительная сходимость расчётного расхода воды от главных насосных станций в водопроводную сеть г. Минска с фактическим составляет 95%. Суммарная относительная сходимость по напору составила 77%.

Для калибровки электронной модели водоснабжения г. Салават были проведены замеры свободного напора (36 точек измерения). Замеры были проведены с использованием манометров марки ДМ02-100-2-М. Полученные результаты натурных измерений были привязаны к соответствующим колодцам в электронной модели водоснабжения.

Для оценки значения шероховатости конкретного трубопровода использовалось уравнение (2). Минимальные значения шероховатости стальных и чугунных трубопроводов, соответствующие минимальному возрасту, были приняты согласно гидравлическому справочнику.

Калибровка электронной модели осуществлялась путем варьирования максимальными значениями шероховатостей стальных и чугунных трубопроводов, которые соответствуют максимальному возрасту трубопроводов. Среднее абсолютное расхождение по свободным напорам между электронной моделью и фактической работой сети составило 4,03%. Среднее абсолютное расхождение по расходам источников между электронной моделью и фактической работой сети составило 0,95%.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Оценка фактического удельного водопотребления в городах-представителях (Пенза, Оренбург, Тюмень) показала, что в последние годы отмечается общая тенденция снижения общей величины подачи воды в сеть и величины удельного водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды жителей исследованных городов. Это в целом требует проведения соответствующих исследований по обоснованию и оптимизации удельных нормативов водопотребления для проектирования централизованных систем водоснабжения, при их развитии и реконструкции и определения технических условий подключения объектов капитального строительства и при проектировании систем внутреннего водопровода.

Для этого были разработаны электронные модели системы водоснабжения, с использованием которых была проведена сравнительная оценка капитальных затрат на развитие систем водоснабжения, при учёте различных норм удельного водопотребления.

На конкретных примерах перспективного развития систем водоснабжения городов-представителей (при использовании нормативных значений удельного водопотребления и при использовании данных, основанных на анализе и прогнозе фактического водопотребления) было показано увеличение капитальных затрат при использовании приведенных в СП нормативов в среднем на 30 %.

На основании проведенного анализа могут быть рекомендованы следующие нормативы удельного водопотребления:

- застройка зданиями, оборудованными внутренним водопроводом и канализацией, с ванными и местными водонагревателями - 140 – 190 л/сут;
- застройка зданиями, оборудованными внутренним водопроводом и канализа-

цией, с ванными и местными водонагревателями с централизованным горячим водоснабжением - 195 – 220 л/сут.

Используя программу водного баланса, а также статистические данные работы системы водоснабжения города Тюмени и данные электронной модели, была получена зависимость прямых потерь воды в системе водоснабжения от давления, наблюдаемого в системе [12].

Также стоит отметить, что электронная модель системы водоснабжения является базисом для проведения таких работ, как:

- выявление проблемных участков в системе и составление списков реконструируемых трубопроводов;
- оптимизация диаметров действующих трубопроводов;
- разработка мероприятий, направленных на недопущение снижения минимально необходимого давления в системе;
- разработка программы по снижению давления в городе;
- выбор точек контроля давления в системе;
- выбор места установки регуляторов давления;
- выбор оптимального режима работы насосных станций;
- разработка программ по снижению всех видов потерь воды.

5. ВЫВОДЫ

1. Электронные модели являются инструментом оценки текущего состояния системы водоснабжения, а также позволяют моделировать её перспективное положение. Для объективной оценки влияния мероприятий, направленных на улучшение работы системы водоснабжения и её развития, необходимо моделирование её работы с использованием адекватной электронной модели. Адекватность электронной модели достигается путем её калибровки.

2. Анализ российского программного обеспечения и сравнения с иностранными аналогами показывает отсутствие ряда необходимых функций для разработки электронных моделей, что потребовало дополнительной разработки необходимых алгоритмов.
3. Институт «МосводоканалНИИпроект» успешно реализовал электронные модели систем водоснабжения таких городов, как Уфа, Иркутск, Пенза, Оренбург, Тюмень, Салават, Минск. На основании опыта реализации была разработана методика построения электронных моделей, а также разработаны алгоритмы, применимые к российскому программному обеспечению «Zulu» и необходимые для построения моделей.
7. Официальный сайт программного обеспечения «ИСИГР» URL: <http://51.isem.irk.ru/> (дата обращения: 16.01.2018).
8. DHI. MIKE URBAN. 2016. 145-150 pp.
9. **Wu Z.Y., Wang Q, Butala S., Mi T.** Darwin Optimization Framework User Manual. Watertown, CT 06795: Bentley Systems, Incorporated, 2011. 28-37 pp.
10. **Некрасов А.В.** Компьютерное моделирование гидродинамических процессов систем водоснабжения. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. с. 161-164.
11. **Koppel T., Vassiljev A.** Calibration of a Model of an Operational Water Distribution System Containing Pipes of Different Age. // *Advances in Engineering Software*, 2009, No. 40, pp. 659-664.
12. **Громов Г.Н., Примин О.Г., Бычков Д.А.** Модель расчета потерь и неучтенных расходов воды в водопроводной сети г. Тюмени. // *Водоснабжение и Санитарная Техника*, 2016, №9, с. 16-22.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 7 декабря 2011 г. №416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении». Принят Государственной Думой 23 ноября 2011 года.
2. Постановление правительства Российской Федерации от 5 сентября 2013 года №782 «О схемах водоснабжения и водоотведения».
3. Официальный сайт программного обеспечения Bentley URL: <https://www.bentley.com/ru> (дата обращения: 16.01.2018).
4. Официальный сайт программного обеспечения Mike Urban URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-urban> (дата обращения: 16.01.2018).
5. Официальный сайт программного обеспечения «Zulu» 2018. URL: <https://www.politerm.com/>.
6. Официальный сайт программного обеспечения «City Com» URL: <http://citycom.ru/citycom/hydrograph/> (дата обращения: 16.01.2018).

REFERENCES

1. Federal Law No. 416-FZ, November 07, 2011 “O Vodosnabzhenii i Vodootvedenii” [On Water Supply and Sanitation]. Adopted by the State Duma on November 23, 2011.
2. Decree of the Government of the Russian Federation of September 5, 2013 No. 782 “O Skhemakh Vodostabzheniia i Vodootvedeniia” [About Schemes of Water Supply and Water Disposal].
3. The official website of the software Bentley URL: <https://www.bentley.com/ru> (Accessed data: January 16, 2018).
4. The official website of the software Mike Urban URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-urban> (Accessed data: January 16, 2018).

5. The official website of the software “Zulu” 2018. URL: <https://www.politerm.com/>.
6. The official website of the software “City Com” URL: <http://citycom.ru/citycom/hydrograph/> (Accessed data: January 16, 2018).
7. The official website of the software “ISIGR”. URL: <http://51.isem.irk.ru/> (Accessed data: January 16, 2018).
8. DHI, MIKE URBAN, 2016, pp. 145-150.
9. **Wu Z.Y., Wang Q, Butala S., Mi T.** Darwin Optimization Framework User Manual. Watertown, CT 06795: Bentley Systems, Incorporated, 2011, pp. 28-37.
10. **Nekrasov A.V.** Komp'uternoe Modelirovanie Gidrodinamicheskikh Protsessov Sistem Vodospabzheniia [Computer Modeling of Hydrodynamic Processes of Water Supply Systems]. Ekaterinburg, Ural Federal University, 2014, pp. 161-164.
11. **Koppel T., Vassiljev A.** Calibration of a Model of an Operational Water Distribution System Containing Pipes of Different Age. // *Advances in Engineering Software*, 2009, No. 40, pp. 659-664.
12. **Gromov G.N., Primin O.G., Bychkov D.A.** Model' Rascheta Poter' i Neuchtennykh Raskhodov Vody v Vodoprovodnoi Seti g. Tiumeni [Model for Analysis of Losses and Unaccounted for Water Flows in the Water Supply Network in Tyumen]. // *Vodospabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2016, No. 9, pp. 16-22.

E-mail: gromov_grigorii@mail.ru.

Oleg G. Primin, Professor, Dr.Sc., Department of National Research Moscow State University of Civil Engineering, Deputy General Director of JSC «Mosvodokanal-NIIproekt»; 22, Pleteshkovsky per., Moscow, 105005, Russia; phone: +7 (495) 956-93-00; E-mail: primin@mvkniipr.ru.

Grigory N. Gromov, Ph.D. student of National Research Moscow State University of Civil Engineering, Head of group of JSC «MosvodokanalNIIproekt»; 22, Pleteshkovsky per., Moscow, 105005, Russia; phone: +7 (495) 956-77-79, E-mail: gromov_grigorii@mail.ru.

Примин Олег Григорьевич, профессор, доктор технических наук; профессор кафедры водоснабжения и водоотведения Национального исследовательского Московского государственного строительного университета; заместитель генерального директора по научным исследованиям АО «МосводоканалНИИпроект»; 105005, Россия, г. Москва, Плетешковский переулок д. 22; тел: +7 (495) 956-93-00; E-mail: primin@mvkniipr.ru.

Григорий Николаевич Громов, заведующий группой АО «МосводоканалНИИпроект»; 105005, Россия, г. Москва, Плетешковский переулок д. 22; тел: +7 (495) 956-77-79;