УДК 628.1:621.3 DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.847-854

АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ И КАЛИБРОВКИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

О.Г. Примин, Г.Н. Громов, А.Э. Тен[1]
МосводоканалНИИпроект, 105005, г. Москва, Плетешковский пер., д. 22;
[1]АО «Мосводоканал», 105005, г. Москва, Плетешковский пер., д. 2

АННОТАЦИЯ: Предмет исследования: износ и техническое состояние трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения в большинстве населенных пунктов России, ограничение материальных ресурсов на их восстановление и обновление в условиях реформирования ЖКХ, требуют научно-обоснованного подхода к реконструкции и модернизации этих систем [1–4].
Для решения этих проблем Правительством РФ утверждены и введены в действие нормативные документы[1, 2]. Согласно им развитие централизованных систем водоснабжения и водоотведения осуществляется только в соответствии с генеральными схемами этих систем[3]. В составе схем необходимо разработать электронную модель централизованной системы водоснабжения и водоотведения города для объективной оценки влияния мероприятий, направленных на оптимизацию их работы [5]. Алгоритм построения и калибровки электронной модели системы водоснабжения города является предметом исследования данной работы.
Цели: разработка методики построения электронных моделей и алгоритмов, калибровки, применимые к российскому программному обеспечению Zulu.
Материалы и методы: для объективной оценки влияния перспективных мероприятий, направленных на улучшение работы водопроводной сети, а также развитие системы водоснабжения города, используется моделирование с реализацией адекватной электронной модели. Адекватность электронной модели достигается путем ее калибровки [6]. Объект исследований — системы водоснабжения г. Минска и г. Салавата при разработке электронных моделей для реализации направлений их развития и реконструкции.
Результаты: на основании опыта реализации на ряде систем водоснабжения (Уфа, Иркутск, Пенза, Оренбург, Тюмень, Салават, Минск) была разработана методика построения и калибровки электронных моделей, а также разработаны алгоритмы, применимые к российскому программному обеспечению Zulu и необходимые для построения моделей.
Выводы: результаты работы внедрены на ряде систем водоснабжения городов России и могут быть рекомендованы для применения информационных технологий реализации электронной модели, оценки и анализа функционирования систем водоснабжения и оптимизации их работы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система, водоснабжение, водопроводная сеть, реконструкция, развитие, электронная модель, алгоритм, калибровка, расчет, реализация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Примин О.Г., Громов Г.Н., Тен А.Э. Алгоритмы построения и калибровки электронных моделей системы водоснабжения // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 7 (118). С. 847–854. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.847-854

ALGORITHMS FOR CONSTRUCTING AND CALIBRATING ELECTRONIC MODELS OF WATER SUPPLY SYSTEM

O.G. Primin, G.N. Gromov, A.E. Ten[1]
MosvodokanalNIIproekt, 22 Pleteshkovsky per., Moscow, 105005, Russian Federation;
[1]Joint Stock Company Mosvodokanal, 2 Pleteshkovsky lane, Moscow, 105005, Russian Federation

ABSTRACT: Subject: the deterioration and technical condition of water supply and drainage pipelines in most of Russia's settlements, the limitation of material resources for their restoration and renovation in conditions of housing and communal services reform, require a scientifically grounded approach to the reconstruction and modernization of these systems [1–4]. To solve these problems, the Government of the Russian Federation approved and introduced normative documents[1, 2]. According to them, the development of centralized water supply and water disposal systems is carried out only in accordance with the general schemes of these systems[3]. As part of these schemes, it is necessary to develop an electronic model of a centralized water supply and disposal system for an objective assessment of the impact of activities aimed at optimizing

[1] О водоснабжении и водоотведении : Федеральный закон от 7.12.2011 г. № 416-ФЗ, принят Государственной Думой 23 ноября 2011 г.
[2] О схемах водоснабжения и водоотведения : Постановление правительства Российской Федерации от 5.09.2013 г. № 782.
[3] Там же.

© О.Г. Примин, Г.Н. Громов, А.Э. Тен, 2018

Вестник МГСУ Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 7, 2018 Volume 13 Issue 7, 2018

their work [5]. The algorithm for constructing and calibrating the electronic model of the city's water supply system is the subject of this study.
Research objectives: development of a methodology for constructing electronic models and algorithms of calibrations which are applicable to the Russian Zulu software.
Materials and methods: for an objective assessment of the impact of long-term measures aimed at improving the operation of the water supply network, as well as the development of the city's water supply system, we use modeling along with the implementation of an adequate electronic model. The adequacy of the electronic model is achieved via its calibration [6]. The object of the research is the water supply system of Minsk and Salavat in the development of electronic models for realization of their development and reconstruction directions.
Results: based on the experience of implementation of a number of water supply systems (Ufa, Irkutsk, Penza, Orenburg, Tyumen, Salavat, Minsk), a methodology for constructing and calibrating electronic models was developed; the algorithms applicable to the Russian Zulu software and necessary for construction of models were also developed.
Conclusions: the results of the work are implemented on a number of water supply systems in the cities of Russia and can be recommended for application of information technologies in electronic model realization, the assessment and analysis of the functioning of water supply systems and the optimization of their operation.

KEY WORDS: system, water supply, water supply network, reconstruction, development, electronic model, algorithm, calibration, calculation, realization

FOR CITATION: Primin O.G., Gromov G.N., Ten A.E. Algoritmy postroeniya i kalibrovki elektronnykh modeley sistemy vodosnabzheniya [Algorithms for constructing and calibrating electronic models of water supply system]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 7 (118), pp. 847–854. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.847-854

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) **Том 13 Выпуск 7, 2018**
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • **Volume 13 Issue 7, 2018**

ВВЕДЕНИЕ

На основании требований, предъявляемых законодательством РФ, развитие водного хозяйства и инженерной инфраструктуры населенных пунктов необходимо осуществлять в соответствии с проектами схем водоснабжения и водоотведения. При численности населения города более 150 тыс. человек данные схемы обязательно должны включать в себя электронные модели систем водоснабжения и водоотведения.

Анализ исследований в области разработки схем водоснабжения и водоотведения городов России показал, что для построения полноценной электронной модели необходим значительный объем информации, которая включает в себя данные по топологии всех существующих трубопроводов, геодезические отметки трубопроводов, характеристику водопотребителей и насосных агрегатов и мн. др. Полный сбор и анализ данных, а так же их отображение в электронном виде может занимать много времени [6].

При отсутствии детализированной электронной модели у предприятия, эксплуатирующего систему водоснабжения города, в рамках проекта по разработке схем водоснабжения, обычно принимается решение о построении на первом этапе ее укрупненной версии, которая позволяет оценить и проанализировать работу магистральных трубопроводов, а также основных насосных станций и регулирующих емкостей. В дальнейшем, исходя из анализа и апробации модели, а также плана развития города и его инфраструктуры, разрабатываются перспективные модели.

Стоит отметить, что требования к разработке электронной модели регламентируются в соответствии с «Правилами разработки и утверждения схем водоснабжения и водоотведения». Однако они относятся к ее содержанию и программному обеспечению и не включают в себя разъяснения в части методики и степени детализации модели, а также предписания к сходимости электронной модели с фактическими показателями работы системы. Большой объем статистической и эксплуатационной информации, сложная конфигурация и структура систем водоснабжения городов, неопределенность спроса на воду потребовали применения информационных технологий для калибровки и реализации электронной модели [5, 6].

МЕТОДЫ

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

На текущий момент для реализации электронных моделей можно использовать различные программные комплексы (Bentley, MIKE URBAN, ZuLu, ИСИГР, Citi Com и др.). В Российской Федерации наиболее популярны отечественные программные продукты, это объясняется небольшой ценой по сравнению с рассмотренными программными комплексами и достаточным набором функций [8]. Однако стоит отметить, что отечественные про-

граммные комплексы уступают иностранным рядом функциональных возможностей, в том числе необходимых для построения электронной модели [7–11].

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 и эксплуатационные сведения по трубопроводам и сооружениям сети.
2. Информация об оборудовании сооружений сети.
3. Статистические данные работы системы водоснабжения.

Различают два вида моделей: детализированная и укрупненная электронная модель. Детализированная электронная модель системы водоснабжения города включает в себя всю информацию о системе водоснабжения. При построении укрупненной модели используется условная схема водоотбора[4].

Условная схема водоотбора предполагает отбор воды из сети путем нефиксированных узловых отборов. Расстановка расчетных узловых отборов производится в местах пересечения магистральных трубопроводов, а также в местах сосредоточенного отбора промышленными предприятиями и другими крупными потребителями воды. Укрупненная электронная модель отличается меньшей степенью сходимости в сравнении с детализированной моделью, а также на порядок меньшим объемом необходимых исходных данных и сроком реализации.

После выбора типа и построения расчетной схемы определяется расходная характеристика модели, которая основывается на анализе эксплуатационных данных фактической подачи насосных станций второго подъема. На основе анализа рассчитывается максимальный день и максимальный час водоподачи. Далее формируется балансовая схема системы, которая включает в себя зоны, а также подзоны системы водоснабжения.

Соответственно балансовой схеме гидравлический расчет системы водоснабжения может быть выполнен на расчетный час или проведено 24-часовое моделирование системы. Стоит отметить, что 24-часовое моделирование системы требует построения 24 балансовых схем соответственно.

При построении укрупненных электронных моделей необходим расчет расхода нефиксированных узловых отборов. Анализ российских программных комплексов показал отсутствие таких функций. В связи с этим нами разработан алгоритм расчета нефиксированных узловых отборов, который применим к программному обеспечению (ПО) ZuLu. Алгоритм реализован на языке Visual Basic for Application (VBA) с использованием таблиц Excel. Структура алгоритма включает в себя:

1. Выгрузку базы данных ПО ZuLu (предварительно узловые отборы нумеруются).
2. Формирование матрицы инцидентности.
3. Занесение данных по расходам зон и подзон системы водоснабжения.
4. Расчет нефиксированных узловых отборов.
5. Загрузку результатов расчета в базу данных «Потребитель» ПО ZuLu.

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 ее 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:

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

где P и Q — измеряемые значения 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.

По сути, функция E (1) представляет собой сумму квадратичных разностей между фактическими данными работы сети и данными моделирования по расходу и свободному напору. Поэтому эта функция отражает сходимость модели с работой реальной сети. Соответственно задача калибровки заключается в минимизации этой функции.

В настоящее время 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 [12].

Анализ российских программных продуктов показал отсутствие функции алгоритмизированной калибровки. В связи с этим нами разработан алгоритм автоматической калибровки электронной модели для российского ПО ZuLu на основе генетического алгоритма. Алгоритм реализован на языке

[4] Справочное пособие 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84*.

Вестник МГСУ Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 13 Выпуск 7, 2018 Volume 13 Issue 7, 2018

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 [13–15] предложена предварительная группировка трубопроводов по шероховатости или другим характеристикам. Для связи материала, года прокладки и шероховатости трубопровода в работе [14] была предложена следующая формула:

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

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

Степень b в формуле (2) позволяет использовать степенную зависимость распределения шероховатости относительно возраста труб. Значение степени b может быть получено на основании реальных замеров гидравлического сопротивления трубопроводов, а также в процессе калибровки. В разработанном алгоритме калибровки степень b принята равной 1, однако, заложены возможности и для ее изменения.

Структура работы алгоритма:

1. В качестве исходных данных задается 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 расчет.

4. 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанный алгоритм расчета расходов нефиксированных узловых отборов был апробирован и внедрен при разработке укрупненной модели водоснабжения г. Минска и калибровки детализированной модели г. Салават.

Построение электронной модели системы водоснабжения г. 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 районных повысительных насосных станций и локальных повысительных насосных станций 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. Минска 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 расчете 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 расчетного расхода воды от главных насосных станций в водопроводную сеть г. Минска с фактическим составляет 95 %. Суммарная относительная сходимость по напору — 77 %.

Для калибровки электронной модели водоснабжения г. Салават были проведены замеры свободного напора (36 точек измерения). Замеры осуществлялись с использованием манометров марки ДМ 02-100-2-М. Полученные результаты натурных измерений были привязаны к соответствующим колодцам в электронной модели водоснабжения.

При реализации калибровки электронной модели учитывалась реальная ситуация в системе водоснабжения города: информация о процессе дросселирования, об отключении водоводов, данные работы регуляторов давления.

Целью калибровки электронной модели сети водоснабжения г. Салават, являлось соблюдение в узловых точках расчетной модели реальных свободных напоров в соответствии с принятым расчетом, а также соблюдение расходов источников водоснабжения в соответствии с принятым расчетным часом.

Алгоритм калибровки детализированной модели г. Салават включал в себя:

1. Выгрузку электронных баз данных о материале и годе прокладки трубопровода из программного комплекса ZuLu.

2. Используя значения из заданного диапазона, рассчитываются значения шероховатости каждого трубопровода на основе формулы (1).

3. Значения шероховатости экспортируются в базу данных ZuLu и производится гидравлический расчет.

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 7, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 7, 2018

4. Используя формулу (1), оценивается значение функции E при заданном значении максимальной шероховатости.

5. На основе полученных значений формируется поверхность, представленная на рисунке.

На основе полученной поверхности пользователем может быть выбрано оптимальное соотношение между максимальными значениями шероховатости и сходимостью модели. Результаты расчетов в графическом и табличном видах представлены в табл. 1 и на рисунке.

Минимальное значение функции E составило 222,02 и при максимальном значении шероховатости стальных трубопроводов — 40 мм; чугунных трубопроводов — 50 мм.

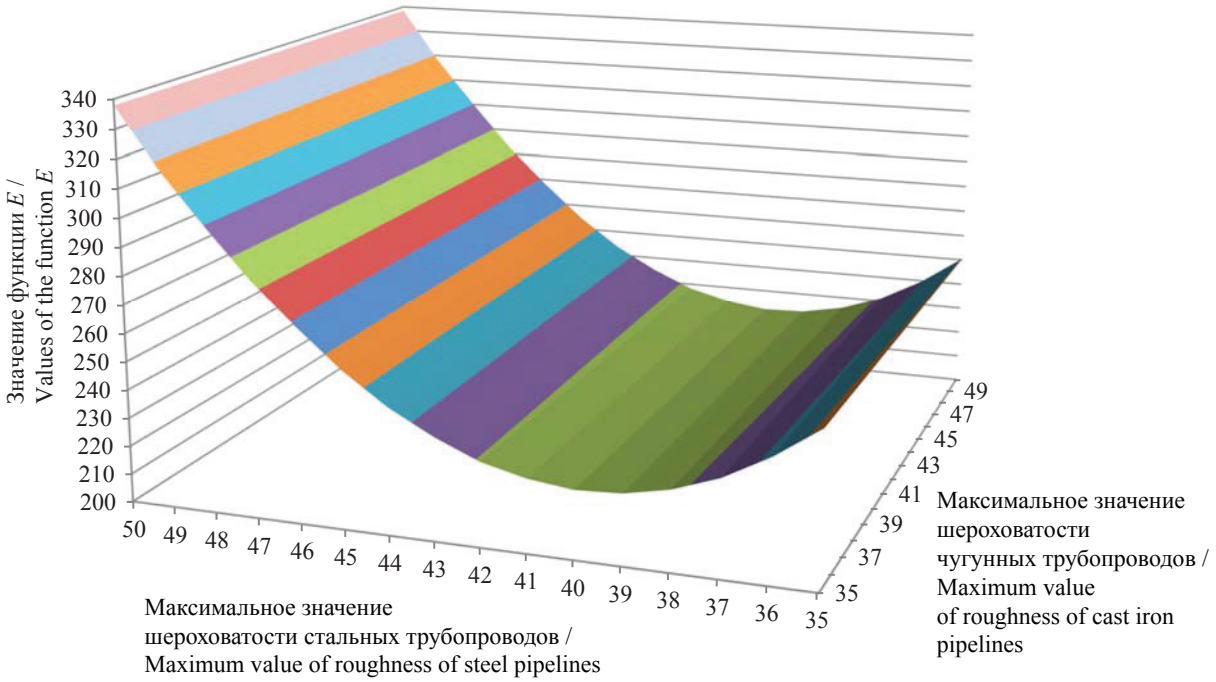
При этом стоит отметить, что влияние шероховатости чугунных трубопроводов незначительное на сходимости модели. Однако оно все же имеет место быть, как представлено в табл. 1. Это обусловливается тем, что количество используемых в сети водоснабжения г. Салавата чугунных трубопроводов в три раза меньше (по длине), чем стальных, а также тем, что стальные трубопроводы в основном располагаются на территории городской застройки, где были выполнены замеры давления. Исследования по влиянию чугунных трубопроводов на сходимости модели будут продолжены.

Для оценки результатов калибровки электронной модели необходимо учитывать полученные средние значения шероховатости трубопроводов

Табл. 1. Значения функции E при различных максимальных значениях шероховатостей (табличный вид)

Table 1. The values of the function E for various maximum values of roughness (tabular form)

Шероховатость стальных трубопроводов, мм / Roughness of steel pipelines, mm	Шероховатость чугунных трубопроводов, мм / Roughness of cast iron pipelines, mm											
	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
45	254,87	254,85	254,79	254,72	254,70	254,63	254,59	254,57	254,52	254,47	254,42
44	244,02	243,95	243,86	243,86	243,81	243,69	243,63	243,60	243,55	243,48	243,40
43	235,71	235,62	235,55	235,43	235,39	235,31	235,27	235,18	235,10	235,03	234,95
42	228,97	228,90	228,80	228,75	228,65	228,58	228,46	228,39	228,33	228,20	228,15
41	225,14	225,05	224,95	224,84	224,73	224,65	224,57	224,48	224,34	224,25	224,12
40	223,16	223,05	222,92	222,79	222,70	222,56	222,42	222,36	222,21	222,14	222,02
39	223,83	223,69	223,55	223,43	223,28	223,17	223,03	222,94	222,78	222,67	222,54
38	227,00	226,86	226,68	226,55	226,41	226,26	226,10	225,99	225,81	225,72	225,55



Значения функции E при различных максимальных значениях шероховатостей (графический вид)

The values of the function E for various maximum values of roughness (graphical form)

Вестник МГСУ Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 7, 2018 Volume 13 Issue 7, 2018

(стальные — 13,58 мм, чугунные — 14,63 мм). Распределение значений шероховатости по участкам трубопроводов представлено в табл. 2.

Результаты сходимости по расходу источников представлены в табл. 3.

Для оценки значения шероховатости конкретного трубопровода использовалось уравнение (2). Калибровка электронной модели осуществлялась путем варьирования максимальными значениями шероховатостей стальных и чугунных трубопроводов, которые соответствуют максимальному возрасту трубопроводов [16]. 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 %.

Электронная модель системы водоснабжения является базисом для проведения следующих работ [17]:

1. Выявление проблемных участков в системе и составление списков реконструируемых трубопроводов.

2. Оптимизация диаметров действующих трубопроводов.

3. Разработка мероприятий, направленных на недопущение снижения минимально необходимого давления в системе.

4. Разработка программы по снижению давления в городе.

5. Выбор точек контроля давления в системе.

6. Выбор места установки регуляторов давления.

7. Выбор оптимального режима работы насосных станций.

8. Разработка программ по снижению всех видов потерь воды.

Табл. 2. Распределение значений шероховатости в электронной модели системы водоснабжения г. Салават

Table 2. Distribution of roughness values in the electronic model of water supply system of Salavat town

Значение шероховатости, мм / Value of roughness, mm	Количество участков в модели, ед. / Number of sites in the model, units	
	сталь / steel	чугун / cast iron
0–10	4132	1149
10–20	768	1413
20–30	753	76
30–40	921	127
40–50	0	222
более 50 / more than 50	0	4

Табл. 3. Результаты сходимости электронной модели г. Салават по расходу источников

Table 3. Results of convergence of the electronic model of Salavat town by the consumption of sources

Наименование источника / Name of the source	Расход модели, л/с / Consumption in the model, l/sec	Фактический расход, л/с / Actual consumption, l/sec	Δ, л/с / Δ, l/sec	IΔI,%
Резервуары / Reservoirs	145,72	145,00	+0,72	0,52
НС II подъема / Pump station of second riser	776,28	777,00	–0,72	0,09

ВЫВОДЫ

1. Цель электронной модели системы водоснабжения — отражение в электронном виде информации о структуре и технико-экономическом состоянии системы. Электронная модель обеспечивает проведение гидравлических расчетов, оценку и анализ работы водопроводной сети, моделирование ее реконструкции и перспективного развития.

Адекватность электронной модели достигается путем ее калибровки.

2. Анализ российского программного обеспечения и его сравнение с иностранными аналогами показывает отсутствие функции калибровки электронной модели, что потребовало дополнительной разработки необходимых алгоритмов.

3. Методика построения электронной модели и алгоритм ее калибровки, применимые к российскому программному обеспечению ZuLu реализованы при разработке укрупненной модели водоснабжения г. Минск и детализированной модели водоснабжения г. Салават.

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 7, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 7, 2018

ЛИТЕРАТУРА

1. *Примин О.Г., Орлов В.А.* Надежность коммунальных трубопроводов и планирование их восстановления // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2016. № 2 (54). С. 21–25.

2. *Пузаков В.С.* Анализ разработки и утверждения схем водоснабжения и водоотведения в Российской Федерации // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 7. С. 4–15.

3. *Чупин Р.В.* Оптимизация перспективных схем развития систем водоотведения в условиях ограниченного финансирования // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 2. С. 44–54.

4. *Примин О.Г., Борткевич В.С., Миркис В.И., Кантор Л.И., Винарский С.Л.* О разработке схем водоснабжения городов России // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 7. С. 24–33.

5. *Крицкий Г.Г.* Инженерная инфраструктура города и цифровые технологии // Водные ресурсы и водопользование. 2018. № 1 (168). С. 28–32.

6. *Sophocleous S., Savic D., Kapelan Z. et al.* Advances in water mains network modelling for improved operations : 13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015 // Procedia Engineering. 2015. No. 119. Pp. 593–602.

7. Официальный сайт программного обеспечения Bentley. URL: https://www.bentley.com/ru.

8. Официальный сайт программного обеспечения MIKE URBAN. URL: https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-urban

9. Официальный сайт программного обеспечения ZuLu. 2018. URL: https://www.politerm.com/.

10. Официальный сайт программного обеспечения City Com. URL: http://citycom.ru/citycom/hydrograph/.

11. Официальный сайт программного обеспечения ИСИГР. URL: http://51.isem.irk.ru/.

12. Руководство пользователя DHI. MIKE URBAN. Pipe Roughness Calibration. 2016. Pp. 145–150.

13. *Wu Z.Y., Wang Q., Butala S., Mi T.* Darwin optimization framework user manual. Watertown, CT 06795. USA : Bentley Systems, Incorporated, 2012. Pp. 28–37.

14. *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.

15. *Grayman W.M., Maslia M.L., Sautner J.B.* Calibrating Distribution System Models with Fire-Flow Tests // American Water Works Association. April 2006. Pp. 10–12. DOI: 10.1002/j.1551-8701.2006.tb01860.x.

16. *Roma J., Perez R., Sanz G., Grau S.* Model calibration and leakage assessment applied to a real Water Distribution Network. 13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015 // Procedia Engineering. 2015. No. 119. Pp. 603–612.

17. *Kara S., Karadirek I.E., Muhammetoglu A., Muhammetoglu H.* Hydraulic Modeling of a Water Distribution Network in a Tourism Area with Highly Varying Characteristics. International Conference on Efficient & Sustainable Water Systems Management toward Worth Living Development, 2nd EWaS 2016 // Procedia Engineering. 2016. No. 162. Pp. 521–529. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.096.

Поступила в редакцию 27 ноября 2017 г.
Принята в доработанном виде 5 апреля 2018 г.
Одобрена для публикации 28 июня 2018 г.

Об авторах: **Примин Олег Григорьевич** — доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора, **МосводоканалНИИпроект**, 105005, г. Москва, Плетешковский пер., д. 22, primin@mvkniipr.ru;

Громов Григорий Николаевич — заведующий группой отдела по проектированию канализационных и водопроводных сооружений, **МосводоканалНИИпроект**, 105005, г. Москва, Плетешковский пер., д. 22, gromov_grigorii@mail.ru;

Тен Андрей Эдисович — заместитель главного инженера ПЭУКС, **АО «Мосводоканал»**, 105005, г. Москва, Плетешковский пер., д. 2, ten_ae@mosvodokanal.ru.

REFERENCES

1. Primin O.G., Orlov V.A. Nadezhnost’ kommunal’nykh truboprovodov i planirovanie ikh vosstanovleniya [Utility pipelines reliability and planning for recovery]. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika* [Pipeline transport: theory and practice]. 2016, no. 2 (54), pp. 21–25. (In Russian)

2. Puzakov V.S. Analiz razrabotki i utverzhdeniya skhem vodosnabzheniya i vodootvedeniya v Rossiyskoy Federatsii [Analysis of water supply and wastewater disposal shemens development and approval in the Russian Federation]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Engineering]. 2015, no. 7, pp. 4–15. (In Russian)

3. Chupin R.V. Optimizatsiya perspektivnykh skhem razvitiya sistem vodootvedeniya v usloviyakh ogranichennogo finansirovaniya [Optimization of the prospective plans of water supply system development under the tight financing conditions]. *Vodosnabzhenie i*

Вестник МГСУ Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 7, 2018 Volume 13 Issue 7, 2018

sanitarnaya tekhnika [Water Supply and Sanitary Engineering]. 2018, no. 2, pp. 44–54. (In Russian)

4. Primin O.G. Bortkevich V.S., Mirkis V.I., Kantor L.I., Vinarskiy S.L. O razrabotke skhem vodosnabzheniya gorodov Rossii [On designing water supply schemes of the Russian cities]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Engineering]. 2014, no. 7, pp. 24–33. (In Russian)

5. Kritskiy G.G., Inzhenernaya infrastruktura goroda i tsifrovye tekhnologii [Engineering infrastructure of cities and digital technologies]. *Vodnye resursy i vodopol'zovanie* [Water resources and water use]. 2018, no. 1 (168), pp. 28–32. (In Russian)

6. Sophocleous S., Savic D., Kapelan Z., Shen Y., Sage P. Advances in water mains network modelling for improved operations. 13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015. *Procedia Engineering*. 2015, no. 119, pp. 593–602.

7. *Ofitsial'nyy sayt programnogo obespecheniya Bentley* [Official site software by Bentley]. URL: https://www.bentley.com/ru. (In Russian)

8. *Ofitsial'nyy sayt programnogo obespecheniya MIKE URBAN* [Official site software by MIKE URBAN]. URL: https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-urban. (In Russian)

9. *Ofitsial'nyy sayt programnogo obespecheniya ZuLu* [Official site software by ZuLu]. 2018. URL: https://www.politerm.com/. (In Russian)

10. *Ofitsial'nyy sayt programnogo obespecheniya City Com* [Official site software by City Com]. URL: http://citycom.ru/citycom/hydrograph/. (In Russian)

11. *Ofitsial'nyy sayt programnogo obespecheniya ISIGR* [Official site software by ISIGR]. URL: http://51.isem.irk.ru/. (In Russian)

12. User manual DHI. MIKE URBAN. Pipe Roughness Calibration. 2016, pp. 145–150.

13. Wu Z.Y., Wang Q., Butala S., Mi T. *Darwin optimization framework user manual.* Watertown, CT 06795. USA, Bentley Systems, Incorporated. 2012, pp. 28–37.

14. 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.

15. Grayman W.M., Maslia M.L., Sautner J.B. Calibrating Distribution System Models with Fire-Flow Tests. *American Water Works Association*. April 2006, pp. 10–12. DOI: 10.1002/j.1551-8701.2006.tb01860.x.

16. Roma J., Perez R., Sanz G., Grau S. Model calibration and leakage assessment applied to a real Water Distribution Network. 13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015. *Procedia Engineering*. 2015, no.119, pp. 603–612.

17. Kara S., Karadirek I.E., Muhammetoglu A., Muhammetoglu H. Hydraulic modeling of a water distribution network in a tourism area with highly varying characteristics. *International conference on efficient & sustainable water systems management toward worth living development, 2nd EWaS 2016. Procedia Engineering*. 2016, no. 162, pp. 521–529. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.096.

Received November 27, 2017.
Adopted in final form on April 5, 2018.
Approved for publication on June 28, 2018.

About the authors: **Primin Oleg Grigorievich** — Doctor of technical Sciences, Professor, Deputy General Director, **MosvodokanalNIIproekt**, 22 Pleteshkovsky lane, Moscow, 105005, Russian Federation; primin@mvkniipr.ru;

Gromov Grigory Nikolaevich — Head of the Department for the design of sewage and water supply facilities, **MosvodokanalNIIproekt**, 22 Pleteshkovsky lane, Moscow, 105005, Russian Federation; gromov_grigorii@mail.ru;

Ten Adilovic Andrey — Sewage Network Operations Division Deputy Chief Engineer, **JSC Mosvodokanal**, 2 Pleteshkovsky lane, Moscow, 105005, Russian Federation; ten_ae@mosvodokanal.ru.

Вестник МГСУ ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) Том 13 Выпуск 7, 2018
Vestnik MGSU • Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering • Volume 13 Issue 7, 2018