Технико-экономическое обоснование стоимости транспортировки сточных вод для ирригационных целей в административном округе Кербела (Ирак)

А.Л.С. Абдуламир^{1,2}, Н.Т. Джумагулова¹

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

² *Университет Кербелы; г. Кербела, Ирак*

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлена оценка экономической целесообразности используемых материалов труб для транспортировки очищенных сточных вод. Выбор производился между трубами из следующих материалов: ковкий чугун, стеклопластик GRP, бетон и пластик. С помощью программного обеспечения WaterCAD V8i произведены гидравлические расчеты работы системы подачи и распределения воды на орошение. Рассмотрены два варианта работы системы при различных расходах и диаметрах: расход — 1,16 м³/с, диаметры труб от 800 до 1200 мм; и расход — 4,63 м³/с, диаметры труб от 1600 до 2000 мм.

Материалы и методы. Источником водоснабжения на орошение являются очищенные сточные воды из очистных сооружений г. Кербела (Ирак). Две гидравлические модели разработаны с учетом указанных расходов. Потери напора оценены для каждой модели исследованных материалов и диаметров труб с помощью программы WaterCAD V8i, а также математической модели для выбора оптимального диаметра.

Результаты. Технико-экономическое обоснование параметров системы при различных расходах рассчитывалось с учетом эксплуатационных затрат на обслуживание.

Выводы. Разработана математическая модель для расчета затрат на транспортировку сточных вод для разных диаметров труб из четырех различных материалов. Соотношение стоимости и диаметра труб из различных материалов было установлено путем разработки эмпирического уравнения в степенной форме. Эксплуатационные расходы рассчитываются с учетом переменных диаметров, расхода двух моделей, потери напора из-за трения с использованием уравнений Дарси – Вейсбаха и Хазена – Вильямса, времени работы в год, стоимости электроэнергии в год и энергоэффективности устройства. Получена математическая модель, с помощью которой можно подобрать наиболее оптимальный диаметр труб.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: системы транспортировки воды, размер трубы, турбулентный поток, экономические затраты, математическое моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Абдуламир А.Л.С., Джумагулова Н.Т. Технико-экономическое обоснование стоимости транспортировки сточных вод для ирригационных целей в административном округе Кербела (Ирак) // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. Вып. 3. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.3.9

Feasibility study of the cost of transporting wastewater for irrigation purposes in the administrative district of Karbala, Iraq

Abdulameer Layth Saeed Abdulameer^{1,2}, Nazira T. Dzhumagulova¹

¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;*

² *University of Karbala; Karbala, Iraq*

ABSTRACT

Introduction. The study presents an assessment of the economic feasibility of different pipe materials used to transport treated wastewater. The choice was made between pipes made of ductile iron, glass-fiber reinforced polyester (GRP), concrete, and plastic. Hydraulic calculations of operation of an irrigation water supply and distribution system were made using WaterCAD V8i software. Two options of the system operation, that entail different flow rates and diameters, are considered: if the flow rate is equal to 1.16 m³/s and pipe diameters vary from 800 mm to 1,200 mm, and if the flow rate is equal to 4.63 m³/s, and pipe diameters vary from 1,600 to 2,000 mm.

Materials and methods. The article analyzes the legal and regulatory documentation on design and construction, urban planning solutions for residential areas, architectural and structural solutions for apartment buildings, statistical and analytical reports on housing construction in Russia, presented on the Internet.

Results. Irrigation water represents treated wastewater fed by the wastewater treatment facilities in the city of Karbala, Iraq. Two hydraulic models were designed with account for the above-mentioned costs. Head losses were estimated for each model with regard for all studied materials and pipe diameters using the WaterCAD V8i software and a mathematical model for the purpose of selecting the optimal pipe diameter.

Conclusions. A mathematical model was developed to calculate the cost of transporting wastewater in pipes having different diameters and made of four different materials. The ratio of costs to the diameter of pipes, made of four different materials, was identified by developing an empirical equation. The co-authors used the Darcy – Weisbach technique and

the Hazen – Williams method to calculate the operating costs with regard for variable diameters, flow rates for the two models, head losses due to friction, annual operation time, annual cost of electric energy, and the energy efficiency of the unit. Thus, a mathematical model was obtained, that can be applied to select the most optimal pipe diameter.

KEYWORDS: water transportation systems, pipe size, turbulent flow, economic expenditures, mathematical modeling

FOR CITATION: Abdulameer L.S.A., Dzhumagulova N.T. Feasibility study of the cost of transporting wastewater for irrigation purposes in the administrative district of Karbala, Iraq. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2021; 11(3):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.3.9 (rus.)

ВВЕДЕНИЕ

Резервы энерго- и ресурсосбережения в системах подачи и распределения воды в значительной мере могут быть реализованы путем рациональной организации гидравлических режимов с применением современных методов математического и компьютерного моделирования. От состояния системы подачи и распределения, эффективности и надежности функционирования зависит бесперебойная работа [1–5].

Рассматриваются напорные трубы для подачи и распределения очищенных сточных вод на дальние расстояния с целью орошения сельскохозяйственных земель [6–11].

Из-за ошибок в проектировании имеют место следующие проблемы — рост затрат на транспорт воды, непроектные режимы работы системы, энергетические и материальные потери и т.д. [12].

Основные энергетические затраты происходят из-за потерь напора в системе и преодоления гидравлических сопротивлений при транспортировке и распределении воды [13–19].

Потери напора в системе транспортировки и распределения рассчитываются с помощью формулы Ф.А. Шевелева (СНиП 2.04.02-84* «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения»), формулы Хазена – Вильямса (в основном используются в зарубежной практике); потери давления определяются по формуле Дарси с учетом запорной арматуры; напор насосного оборудования — по зависимости, которая аппроксимирует его рабочую характеристику. Кроме потерь напора, должны учитываться шероховатость стенок труб в зависимости от материала, режимы движения жидкости в трубах, скорости воды и т.д. [20–25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постоянные и эксплуатационные расходы

Фиксированная стоимость C_f трубопровода L выражается [11]:

$$C_f = PL \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}, \quad (1)$$

где C_f — фиксированная стоимость, \$/год; P — текущая сумма; L — длина трубы, м; i — процентная ставка, доля; n — срок службы трубы, лет.

Стоимость эксплуатации C_o также зависит от следующих факторов:

$$C_o = f(d, Q, h_f, t, C_e, \eta). \quad (2)$$

Годовые эксплуатационные расходы на преодоление трения составляют:

$$C_o = \frac{0,746 W Q h_{f-c_e} t}{75 \eta}. \quad (3)$$

При подстановке значения $h_f = \frac{8 L Q^2}{\pi^2 g d^5}$ в уравнение (2) получим:

$$C_o = \frac{8,103 \cdot 10^{-4} W Q^3 l h_f C_e t}{\eta d^5}. \quad (4)$$

Потери мощности из-за трения PS в лошадиных силах определяются как:

$$PS = \frac{W Q h_f}{75 \eta}. \quad (5)$$

Годовые потери мощности из-за трения PS рассчитываются в киловатт-часах в виде:

$$PS = \frac{0,746 W Q h_{f_i}}{75 \eta}. \quad (6)$$

Таким образом, $C_i = C_f + C_o$;

$$C_i = PL \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + \frac{8,103 \cdot 10^{-4} W Q^3 l h_f C_e t}{\eta d^5}, \quad (7)$$

где C_i — общая стоимость, \$/год; C_f — фиксированная стоимость в год, \$/год; C_o — эксплуатационные расходы в год, \$/год; P — цена за единицу длины трубы, \$/м; L — длина трубы, м; i — проценты, коэффициент, (дробь); n — срок службы трубы, лет; W — удельный вес воды, кг/м³; Q — расход (сумес); h_f — потери напора из-за трения, м; C_e — стоимость электроэнергии, \$/кВтч; t — использование насоса, час/год; η — КПД энергоблока (фракция); d — диаметр трубы, м.

Критерии выбора оптимальных параметров труб

В расчете используется стоимость трубы на единицу длины для разного сортамента материала труб. Цены на трубы в расчетах соответствуют ценам для административного округа Кербела. Применяется эмпирическое уравнение, связывающее цену с диаметром:

$$P = a(d)^b, \quad (8)$$

где P — цена за единицу длины, \$; d — диаметр, мм; a и b — константы.

Критерий выбора самой экономичной трубы — диаметр, при котором сумма фиксированных и переменных затрат в год минимальна. Общая стоимость состоит из фиксированных и эксплуатационных затрат. Фиксированная стоимость зависит от перво-

начальной стоимости и гарантийного срока службы оборудования. Переменная стоимость — это функция потери напора h_f ; расхода Q , количества часов, в которой система работала в году. Значение h_f получено из формул Дарси – Вейсбаха и Хазена – Вильямса с использованием WaterCAD V8i, эмпирическая зависимость между ценой за единицу длины трубы и диаметром была заменена на уравнение, где можно дифференцировать по диаметру и приравнять к нулю для получения экономически выгодного диаметра трубы. На рис. 1 представлена схема распределения затрат в зависимости от диаметра трубы.

Построение схемы транспортировки воды

Схема транспортировки воды из очистных сооружений г. Кербела до ирригационных земель построена с использованием программного обеспечения WaterCAD V8i со всеми необходимыми исходными данными (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнительный анализ

Сравнительную оценку и выбор наилучшего варианта коммуникаций трубопроводов, а также подбор насосного оборудования, определение гидравлических сопротивлений в этих коммуникациях можно проводить методами моделирования. С помощью программно-вычислительного комплекса WaterCAD V8i выполнены гидравлические расчеты для труб разного диаметра и из различных материалов. Потери напора в системе рассчитывались с помощью уравнений Дарси – Вейсбаха и Хазена – Вильямса. В результате моделирования выявлена зависимость потерь напора в коммуника-

циях от диаметра трубы. Относительная шероховатость с уменьшением диаметра трубы в два раза увеличивается. С увеличением относительной шероховатости в два раза значения чисел Рейнольдса, соответствующие нижним пределам автомоделной области, уменьшаются в 1,5–3,0 раза и приводят к увеличению затрат на электроэнергию. Выбор оптимального диаметра труб — одна из главных задач в системе водоснабжения и водоотведения.

При анализе рассматриваются два типа затрат: постоянные и эксплуатационные затраты. На рис. 3 показана взаимосвязь между годовыми затратами на транспортировку очищенных сточных вод и диаметрами труб из четырех различных материалов. Расстояние передачи между двумя станциями составляет 8200 м.

В целом увеличение годовой стоимости транспортировки воды можно наблюдать по мере уменьшения диаметра трубы для обоих уравнений из-за потерь напора.

Для двух расходов после расчета потери напора годовые затраты на перекачку воды были рассчитаны с использованием уравнения (4). Результаты показали, что самые высокие годовые затраты на транспортировку воды были для диаметра 800 мм — 19 645 655,55 \$, и для диаметра 1600 мм — 20 998 326,67 \$ для труб из стеклопластика, что является очень высокой стоимостью. При самых низких затратах на транспортировку труб такого же диаметра зафиксированы затраты 6 445 344,405 \$ и 742,9960,364 \$ для труб из пластика. Изменение диаметра трубы с 800 на 1000 мм, а также с 1600 на 1800 мм для двух расходов привело к процентному снижению годовых затрат (89,6; 89,9; 89,4 и 88,8 %) и (69,7; 70,2; 69,5 и 68,6 %) для материалов труб (ковкий чугун, стеклопластик, бетон и пластик).

Стоимость эксплуатации включает количество энергии, потребляемой во время работы энергосистемы для преодоления потери напора в трубах различного диаметра. Эксплуатационные затраты оценивались ежегодно, при этом они уменьшались с увеличением диаметра трубы для всех типов труб. Стоимость эксплуатации зависит от различных факторов, таких как диаметр трубы, скорость нагнетания, потери напора из-за трения, часы работы насоса в год, стоимость электроэнергии за киловатт-час и эффективность энергоблока.

Эмпирическая формулировка соотношений стоимости и диаметра труб

Чтобы вывести экспоненциальное математическое уравнение между стоимостью и диаметром, были выбраны трубы разных диаметров из разных материалов: ковкий чугун, стеклопластик, бетон и пластик. С помощью полученной математической формулы произведены расчеты стоимости для всех материалов труб диаметром 800–1200 мм для первой модели

Рис. 1. Упрощенная схема затрат на насос в зависимости от диаметра трубопровода: с увеличением диаметра затраты на прокладку трубы (строительство) растут, но потери напора уменьшаются, что подразумевает снижение затрат на электроэнергию

Scenario: Base

M1001.wtg
04/08/2021

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods Solution Center
27 Siemon Company Drive Suite 200 W. Watertown, CT 06795 USA +1-203-755-1666

Bentley WaterCAD V8i (SELECTseries 6)
[08/11/06/55]
Page 1 of 1

a

Scenario: Base

M1001.wtg
04/08/2021

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods Solution Center
27 Siemon Company Drive Suite 200 W. Watertown, CT 06795 USA +1-203-755-1666

Bentley WaterCAD V8i (SELECTseries 6)
[08/11/06/55]
Page 1 of 1

b

Рис. 2. Схема транспортировки воды из очистных сооружений г. Кербела до ирригационных земель: *a* — расположение двух станций; *b* — имитационная модель

и 1600–2000 мм для второй модели. Цены на материалы труб и разные размеры соответствуют ценам в административном округе Кербела. Соотношение стоимости и диаметра труб показано на рис. 4. Из рис. 4 очевидно, что существует экспоненциальная зависимость между стоимостью и диаметром труб из различных материалов. На основе экспоненциальных

графиков разработаны уравнения кривой мощности между текущей стоимостью P и диаметром трубы d , изготовленной из различных материалов:

- для ковкого чугуна

$$P = 13,472d^{0,4612}; \quad (9)$$

- для стеклопластика GRP

$$P = 0,0046d^{1,5644}; \quad (10)$$

Рис. 3. Соотношение годовых затрат на транспортировку очищенных сточных вод и диаметров труб для четырех материалов: *a* — ковкий чугун; *b* — стеклопластик GRP; *c* — бетон; *d* — пластик

Рис. 4. Соотношение между стоимостью и диаметром для четырех материалов: а — ковкий чугун; б — стеклопластик GRP; в — бетон; г — пластик

для бетона

$$P = 0,0026d^{1,7959}; \quad (11)$$

для пластика

$$P = 0,0012d^{1,8197}; \quad (12)$$

Фиксированная стоимость выбранных труб определена с учетом зависимости диаметра, стоимости через уравнение (1) фиксированных затрат для выбранных труб (табл.).

Значения фиксированной стоимости для труб из разных материалов

Название трубы	Фиксированная стоимость, C_f
Ковкий чугун	$13,472d^{0,4612}L \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$
Стеклопластик GRP	$0,0046d^{1,5644}L \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$
Бетон	$0,002d^{1,7959}L \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$
Пластик	$0,0012d^{1,8197}L \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$

Примечание: d — диаметр трубы, м; P — цена за единицу длины трубы, \$/м; i — проценты, коэффициент, дробь; n — срок службы трубы, лет; C_f — фиксированная стоимость в год, \$/год; L — длина трубы, м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана математическая модель для расчета затрат на транспортировку сточных вод для разных диаметров труб из четырех различных материалов.

Соотношение стоимости и диаметра труб из различных материалов было установлено путем разработки эмпирического уравнения в степенной форме.

Эксплуатационные расходы рассчитываются с учетом переменных диаметров, расхода двух моделей, потери напора из-за трения с использованием

уравнений Дарси – Вейсбаха и Хазена – Вильямса, времени работы в год, стоимости электроэнергии в год и энергоэффективности устройства.

Фиксированная стоимость определяется с использованием текущей рыночной стоимости труб, коэффициента возврата затрат на единицу длины трубы.

Таким образом, получена математическая модель, с помощью которой можно подобрать наиболее оптимальный диаметр труб. При выборе минимальных диаметров труб — низкие затраты на строительство, но высокие затраты электроэнергии и наоборот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А. Инновационный программный комплекс «ИСИГР» для моделирования режимов работы систем водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 12. С. 45–49.
2. Abduro S., Sreenivasu G. Assessments of urban water supply situation of Adama Town, Ethiopia // Journal of Civil Engineering Research. 2020. Vol. 10. Issue 1. Pp. 20–28. DOI: 10.5923/j.jce.20201001.03
3. Rezagama A., Handayani D.S., Zaman B., Putra R.R.S. Design Optimization of water distribution suburban area in Mranggen, Semarang, Indonesia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Sci-

- ence. 2020. Vol. 448. P. 012066. DOI: 10.1088/1755-1315/448/1/012066
4. Terlumun U.J., Ekwule O.R. Evaluation of municipal water distribution network using watercard and watergems // Journal of Engineering and Sciences. 2019. Vol. 5. Issue 2. Pp. 147–156.
5. Bhaskar S.P., Dr. More Ashok B., Rout A.K., Rajendra G.M. Feasibility analysis of water distribution system for Yavatmal city using WaterGems Software // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2017. Vol. 6. Issue 7. Pp. 13706–13713. DOI: 10.15680/IJIR-SET.2017.0607132

6. Achour B., Amara. New formulation of the Darcy-Weisbach friction factor // Larhyss Journal. 2020. Issue 43. Pp. 13–22.
7. Jamil R., Mujeebu M.A. Empirical relation between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for cold and hot water flow in plastic pipes // Water. 2019. Vol. 10. Pp. 104–114. DOI: 10.14294/WATER.2019.1
8. Kuok K.K., Chiu P.C., Ting D.C.M. Evaluation of “C” values to head loss and water pressure due to pipe aging: case study of Uni-central Sarawak // Journal of Water Resource and Protection. 2020. Vol. 12. Issue 12. Pp. 1077–1088. DOI: 10.4236/jwarp.2020.1212064
9. Niazkar M., Talebbeydokhti N., Afzali S.H. Relationship between Hazen-William coefficient and Colebrook-White friction factor: Application in water network analysis // European Water. 2017. Vol. 58. Pp. 513–520.
10. Mohsenabadi S.K., Biglari M.R., Moharrampour M. Comparison of explicit relations of darcy friction measurement with colebrook-white equation // Applied mathematics in Engineering, Management and Technology. 2014. Vol. 2. Issue 4. Pp. 570–578.
11. Arunjyoti S., Senapati S.C., Adamala S. A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems // African Journal of Agricultural Research. 2016. Vol. 11. Issue 8. Pp. 683–692. DOI: 10.5897/AJAR2015.10648
12. Cafaro V.G., Cafaro D.C., Cerda J. Improving the mathematical formulation for the detailed scheduling of refined products pipelines by accounting for flow rate dependent pumping costs // Iberoamerican Journal of Industrial Engineering. 2013. Vol. 5. Issue 10. Pp. 115–128. DOI: 10.13084/2175-8018.v05n10a09
13. Hashemi S., Fillion Y., Speight V., Long A. Effect of pipe size and location on water-main head loss in water distribution systems // Journal of Water Resources Planning and Management. 2020. Vol. 146. Issue 6. P. 06020006. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001222
14. Cabrera E., Gómez E., Cabrera Jr.E., Soriano J. Calculating the economic level of friction in pressurized water systems // Water. 2018. Vol. 10. Issue 6. Pp. 763. DOI: 10.3390/w10060763
15. Berhane T.G., Aregaw T.T. Optimization of water distribution system using WaterGEMS: the case of Wukro Town, Ethiopia // Civil and Environmental Research. 2020. Vol. 12. Issue 6. DOI: 10.7176/CER/12-6-01
16. Michalos C. Consequences of under-estimating friction losses in wastewater forcemains // Pipelines 2020. 2020. DOI: 10.1061/9780784483213.002
17. Mahar P.S., Singh R.P. Optimal design of pumping mains considering pump characteristics // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. 2014. Vol. 5. Issue 1. P. 04013010. DOI: 10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000157
18. Asim T., Mishra R., Kollar L.E., Pradhan S.R. Optimal sizing and life-cycle cost modelling of pipelines transporting multi-sized solid-liquid mixtures // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2014. Vol. 113. Pp. 40–48. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.11.003
19. Martin-Candilejo A., Santillán D., Iglesias A., Garrote L. Optimization of the design of water distribution systems for variable pumping flow rates // Water. 2020. Vol. 12. Issue 2. P. 359. DOI: 10.3390/w12020359
20. Hany G. Radwan. Sensitivity analysis of head loss equations on the design of improved irrigation on-farm system in egypt // International Journal of Advancements in Research & Technology. 2013. Vol. 2. Issue 1.
21. Frederick S.M. Standard handbook for civil engineers. New York : McGraw Hill, 1983. Pp. 20–22.
22. Micheal A.M. Irrigation theory and practice. New Delhi : Vikas Publishers, 1998. Pp. 279–282.
23. Alamu O.J., Adigun O.J., Durowoju M.O. Computer — aided optimum pipe size selection for non viscous flow // Annals of Engineering Analysis. 2002. Vol. 1. Issue 4. Pp. 30–39.
24. Зуйков А.Л. Гидравлика. Т. 2 : учебник. М. : МГСУ, 2015.
25. Гуринович А.Д., Бойцов В.Г. Методологические подходы анализа состояния и перспектив развития систем водоснабжения городов с использованием информационных технологий // Вестник Брестского государственного технического университета. 2018. № 2. С. 100–104.

Поступила в редакцию 2 августа 2021 г.

Принята в доработанном виде 14 сентября 2021 г.

Одобрена для публикации 14 сентября 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: Абдуламир Лейс Санд Абдуламир — аспирант кафедры гидравлики и гидротехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; преподаватель кафедры нефтяной инженерии; **Университет Кербелы;** Ирак, мухафаза Кербела, г. Кербела; laith_eng2009@yahoo.com;

Назира Тентимишовна Джумагулова — доктор технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; dnazira@rambler.ru.

INTRODUCTION

To a large extent, selection of rational hydraulic modes, using cutting-edge methods of mathematical and computer modeling, can save energy and resources of water supply and distribution systems. Their continuous, effective, and reliable operation depends on their condition [1–5].

The co-authors analyze the pressure pipes, designated for the supply, distribution and transporting of treated wastewater over large distances for the purpose of irrigation of agricultural land [6–11].

Design errors may cause the following problems: rising costs of water transporting, irregular system operation modes, energy and material losses, etc. [12].

Major energy losses are caused by the loss of pressure in the system and the need to overcome hydraulic resistance in the process of water transporting and distribution [13–19].

Pressure losses in the system of water transportation and distribution are calculated according to the F.A. Shevelev formula (Construction Norms and Regulations 2.04.02-84* “Water supply. External supply lines and structures”), the Hazen-Williams method (mainly used abroad); pressure losses are identified using the Darcy – Weisbach technique with account for the shutoff valves; the pump pressure is identified using the dependency that approximates its performance characteristic. Besides the pressure loss, pipe surface roughness must be taken into account. It depends on the material, the liquid transportation mode inside the pipes, water velocity, etc. [20–25].

MATERIALS AND METHODS

Fixed and operating costs

Fixed cost C_f of pipeline L is identified as follows [11]:

$$C_f = PL \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}, \quad (1)$$

where C_f is the fixed cost, \$/year; P is the current amount; L is the pipeline length, m; i is the per cent rate, or share; n is the pipeline service period, years.

Operating cost C_o also depends on the following factors:

$$C_o = f(d, Q, h_f, t, C_e, \eta). \quad (2)$$

The annual operating cost, associated with the overcoming of friction, reaches:

$$C_o = \frac{0,746 W Q h_{f-c_e} t}{75 \eta}. \quad (3)$$

If we substitute value in equation (2), we obtain:

$$C_o = \frac{8,103 \cdot 10^{-4} W Q^3 l h_f C_e t}{\eta d^5}. \quad (4)$$

Capacity loss due to friction PS , is identified as follows, if calculated in the horsepower:

$$PS = \frac{W Q h_f}{75 \eta}. \quad (5)$$

Annual heat losses due to friction PS are calculated in kilowatt hours:

$$PS = \frac{0,746 W Q h_{f_i}}{75 \eta}. \quad (6)$$

Therefore, $C_t = C_f + C_o$;

$$C_t = PL \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + \frac{8,103 \cdot 10^{-4} W Q^3 l h_f C_e t}{\eta d^5}, \quad (7)$$

where C_t is the total cost, \$/year; C_f is the annual fixed cost, \$/year; C_o is the operating cost per year, \$/year; P is the cost per pipe unit length, \$/m; L is the pipeline length, m; i is the per centum coefficient (a fraction); n is the pipe service life, years; W is the unit water mass, kg/m³; Q is the flow rate (m³/s); h_f is head loss due to friction, m; C_e is the cost of electric power, \$/kwatt hour; t is the pump operating time, hours/year; η is the power generator efficiency (fraction); d is the pipe diameter, m.

Optimal pipe parameters: selection criteria

The pipe cost per unit of length is used for different gauges of pipe materials. Pipe prices are the same as those typical for the administrative district of Karbala. An empirical equation, tying the price to the diameter, is used:

$$P = a(d)^b, \quad (8)$$

where P is the price per unit of length, \$; d is the diameter, mm; a and b are constant values.

The criterion that determines the choice of the most cost effective pipe represents the diameter that ensures the minimal sum of fixed and variable annual costs. The total cost is composed of fixed and operating expenses. Fixed costs depend on the initial costs and the warranty life of the equipment. The variable cost represents the function of head loss h_f ; flow rate Q , the number of hours of the system operation during a year. The value of h_f is obtained using the Hazen-Williams and the Darcy – Weisbach methods, applied in WaterCAD V8i; the empirical dependence between the unit pipeline price and the diameter was replaced by the equation that makes it possible to differentiate on the diameter and set to zero in order to obtain an economical pipeline diameter. Fig. 1 shows the breakdown of expenses depending on the pipe diameter.

Water transportation route

The water transportation route, used to deliver water from the water treatment facilities in Karbala to the areas to be irrigated, is made using WaterCAD V8i software and all the input data needed (Fig. 2).

Fig. 1. A simplified breakdown of pump costs depending on the pipeline diameter: pipeline laying costs (construction) go up together with the diameter increase, but pressure losses go down and reduce energy costs

RESEARCH RESULTS

Comparative analysis

Simulation methods can be applied to perform the comparative assessment, select the most suitable pipeline and pump, and identify values of hydraulic resistances. Software package WaterCAD V8i is used to perform the hydraulic analysis for different diameters of pipes made of different materials. Pressure losses in the system were calculated using the Hazen – Williams and the Darcy – Weisbach methods. The simulation identified a dependence between the pressure loss and the pipe diameter. Relative roughness goes up, if the pipe diameter doubles. If relative roughness doubles, values of the Reynolds numbers, corresponding to the bottom limits of the automatically simulated domain, go down 1.5–3.0-fold and cause an increase in energy costs. The choice of the optimal pipe diameter is one of principal challenges in water supply and discharge.

Fixed and operating costs are considered in the course of analysis. Fig. 3 shows interdependence between annual treated wastewater transportation costs and diameters of pipes made of four different materials. The distance between the two stations is 8,200 m.

On the whole, a rise in the annual water transportation cost accompanies a reduction in the pipe diameter due to the head loss, which is true for both equations.

Annual water pumping costs were calculated using equation (4) for the two types of expenses. The results have shown that annual water transportation costs were maximal for the 800 mm pipe and they reached 19,645,655.55 \$, and for 1,600 mm pipes they were equal to 20,998,326.67 \$ for GRP

pipes, and these costs were extremely high. The lowest costs of transportation in case of the same diameter of pipes were equal to 6,445,344.405 \$ and 742,9960.364 \$ for plastic pipes. A pipe diameter change from 800 mm to 1,000 mm, and from 1,600 mm to 1,800 mm for the two flow rates caused a per centum reduction of annual expenses (89.6; 89.9; 89.4 and 88.8 %) and (69.7; 70.2; 69.5 and 68.6 %) for such pipe materials as ductile iron, GRP, concrete and plastic.

The cost of operation encompasses the amount of energy, consumed in the process of operation of the energy system used to overcome the head loss inside pipes having different diameters. Costs of operation were analyzed on the annual basis, and they went down if the pipe diameter went up. This was true for all types of pipes. The cost of operation also depends on various factors, such as the pipe diameter, the pumping velocity, the head loss due to friction, annual pump operation hours, the energy cost per kwatt hour and the energy unit efficiency.

An empirical formulation of the cost to pipe diameter relationship

Pipes, having different diameters and made of different materials, including ductile iron, GRP, concrete and plastic, were chosen to derive an exponential mathematical equation tying the cost to the diameter. The mathematical formula thus derived was used to calculate the costs for all pipe materials having the diameters of 800–1,200 mm for the first model and 1,600–2,000 mm for the second model. The prices for pipes made of these materials and having the aforementioned diameters, are the same as those typical for the administrative district of Karbala. The relationship between the pipe cost and diameter is shown in Fig. 4. Fig. 4 shows an exponential dependency between the cost and the diameter of pipes made of different materials. Exponential graphs were used to make equations of capacity curves between current cost P and diameter d of the pipe, made of different materials:

- for ductile iron

$$P = 13,472d^{0.4612}; \quad (9)$$

- for GRP

$$P = 0,0046d^{1.5644}; \quad (10)$$

- for concrete

$$P = 0,0026d^{1.7959}; \quad (11)$$

- for plastic

$$P = 0,0012d^{1.8197}. \quad (12)$$

The fixed cost of pipes is identified with regard for the dependence between the diameter and the cost using equation (1) for the fixed cost of selected pipes (see the table).

Scenario: Base

M1001.wtg
04/08/2021

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods Solution Center
27 Siemon Company Drive Suite 200 W. Watertown, CT 06795 USA +1-203-755-1868

Bentley WaterCAD V8i (SELECTseries 6)
[08.11.06.58]
Page 1 of 1

a

Scenario: Base

M1001.wtg
04/08/2021

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods Solution Center
27 Siemon Company Drive Suite 200 W. Watertown, CT 06795 USA +1-203-755-1868

Bentley WaterCAD V8i (SELECTseries 6)
[08.11.06.58]
Page 1 of 1

b

Fig. 2. The water transportation route from the water treatment facilities in Karbala to the areas to be irrigated: *a* is the location of the two stations; *b* is the simulation model

CONCLUSION AND DISCUSSION

The co-authors have developed a mathematical model for the calculation of wastewater transportation costs for different diameters of pipes made of four different types of materials.

The correlation between the cost and the diameter of pipes made of different materials was identified by deriving an empirical equation in the power form.

The co-authors used the Darcy – Weisbach technique and the Hazen – Williams method to calculate the costs of operation with regard for variable dia-

eters, flow rates of the two models, head losses due to friction, the annual time of operation, the annual cost of energy and the energy efficiency of the unit.

The fixed cost is identified with regard for the current market price of pipes, the rate of cost return per unit of pipe length.

Therefore, the co-authors have developed a mathematical model that can be used to select the optimal diameter of pipes. If minimal diameters are chosen, construction costs are also minimal, but energy costs are high, and vice versa.

Fig. 3. The correlation between the annual cost of transportation of treated wastewater and the diameter of pipes made of four types of materials: *a* is the ductile iron; *b* is glass-fiber reinforced polyester (GRP); *c* is concrete; *d* is plastic

Fig. 4. Relationship between the cost and the diameter for the four types of materials: *a* — ductile iron; *b* — GRP; *c* — concrete; *d* — plastic

Values of the fixed cost of pipes made of different materials

Pipe material	Fixed cost, C_f
Ductile iron	$13,472 d^{0.4612} L \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$
GRP	$0,0046 d^{1.5644} L \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$
Concrete	$0,002 d^{1.7959} L \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$
Plastic	$0,0012 d^{1.8197} L \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$

Note: d is the pipe diameter, m; P is the price per the unit of pipe length, \$/m; i means per centum, coefficient, fraction; n is the pipe service life, years; C_f is the fixed annual cost, \$/year; L is the pipe length, m.

REFERENCES

- Novitsky N.N., Mikhailovsky E.A. Innovative software complex "ISIGR" for modeling the operating modes of water supply systems. *Water Supply and Sanitary Equipment*. 2017; 12:45-49. (rus.).
- Abduro S., Sreenivasu G. Assessments of urban water supply situation of Adama Town, Ethiopia. *Journal of Civil Engineering Research*. 2020; 10(1):20-28. DOI: 10.5923/j.jce.20201001.03
- Rezagama A., Handayani D.S., Zaman B., Putra R.R.S. Design optimization of water distribution suburban area in Mranggen, Semarang, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 448:012066. DOI: 10.1088/1755-1315/448/1/012066
- Terlumun U.J., Ekwule O.R. Evaluation of municipal water distribution network using watercard and watergems. *Journal of Engineering and Sciences*. 2019; 5(2):147-156.
- Bhaskar S.P., Dr. More Ashok B., Rout A.K., Rajendra G.M. Feasibility analysis of water distribution system for Yavatmal city using WaterGems software. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2017; 6(7):13706-13713. DOI: 10.15680/IJRSET.2017.0607132
- Achour B., Amara. New formulation of the Darcy-Weisbach friction factor. *Larhyss Journal*. 2020; 43:13-22.
- Jamil R., Mujeebu M.A. Empirical Relation between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach Equations for Cold and Hot Water Flow in Plastic Pipes. *Water*. 2019; 10:104-114. DOI: 10.14294/WATER.2019.1
- Kuok K.K., Chiu P.C., Ting D.C.M. Evaluation of "C" values to head loss and water pressure due to pipe aging: case study of uni-central Sarawak. *Journal of Water Resource and Protection*. 2020; 12(12):1077-1088. DOI: 10.4236/jwarp.2020.1212064
- Niazkar M., Talebbeydokhti N., Afzali S.H. Relationship between Hazen-William coefficient and Colebrook-White friction factor: Application in water network analysis. *European Water*. 2017; 58:513-520.
- Mohsenabadi S.K., Biglari M.R., Moharrampour M. Comparison of explicit relations of darcy friction measurement with colebrook-white equation. *Applied mathematics in Engineering, Management and Technology*. 2014; 2(4):570-578.
- Arunjyoti S., Senapati S.C., Adamala S. A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems. *African Journal of Agricultural Research*. 2016; 11(8):683-692. DOI: 10.5897/AJAR2015.10648
- Cafaro V.G., Cafaro D.C., Cerda J. Improving the mathematical formulation for the detailed scheduling of refined products pipelines by accounting for flow rate dependent pumping costs. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*. 2013; 5(10):115-128. DOI: 10.13084/2175-8018.v05n10a09
- Hashemi S., Filion Y., Speight V., Long A. Effect of pipe size and location on water-main head loss in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2020; 146(6):06020006. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001222
- Cabrera E., Gómez E., Cabrera Jr.E., Soriano J. Calculating the economic level of friction in pressurized water systems. *Water*. 2018; 10(6):763. DOI: 10.3390/w10060763

15. Berhane T.G., Aregaw T.T. Optimization of water distribution system using WaterGEMS: the case of Wukro Town, Ethiopia. *Civil and Environmental Research*. 2020; 12(6). DOI: 10.7176/CER/12-6-01
16. Michalos C. Consequences of under-estimating friction losses in wastewater forcemains. *Pipelines* 2020. 2020. DOI: 10.1061/9780784483213.002
17. Mahar P.S., Singh R.P. Optimal design of pumping mains considering pump characteristics. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2014; 5(1):04013010. DOI: 10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000157
18. Asim T., Mishra R., Kollar L.E., Pradhan S.R. Optimal sizing and life-cycle cost modelling of pipelines transporting multi-sized solid-liquid mixtures. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2014; 113:40-48. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2013.11.003
19. Martin-Candilejo A., Santillán D., Iglesias A., Garrote L. Optimization of the Design of Water Distribution Systems for Variable Pumping Flow Rates. *Water*. 2020; 12(2):359. DOI: 10.3390/w12020359
20. Hany G. Radwan. Sensitivity analysis of head loss equations on the design of improved irrigation on-farm system in Egypt. *International Journal of Advancements in Research & Technology*. 2013; 2(1).
21. Frederick S.M. *Standard Handbook for Civil Engineers*. New York, McGraw Hill, 1983; 20-22.
22. Micheal A.M. *Irrigation Theory and Practice*. New Delhi, Vikas Publishers, 1998; 279-282.
23. Alamu O.J., Adigun O.J., Durowoju M.O. Computer — aided Optimum Pipe Size Selection for Non Viscous Flow. *Annals of Engineering Analysis*. 2002; 14):30-39.
24. Zuikov A.L. *Hydraulics. Volume 2: textbook*. Moscow, MGSU, 2015. (rus.).
25. Gurinovich A.D., Boytsov V.G. Methodological approaches for analysis of the state and prospects of development of water supply systems of cities using information technologies. *Repository of Brest State Technical University*. 2018; 2:100-104. (rus.).

Received August 2, 2021.

Adopted in revised form on September 14, 2021.

Approved for publication on September 14, 2021.

B I O N O T E S: **Abdulameer Layth Saeed Abdulameer** — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Lecturer of the Department of Petroleum Engineering; **University of Karbala**; Iraq, Karbala governorate, Karbala city; laith_eng2009@yahoo.com;

Nazira T. Dzhumagulova — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; dnazira@rambler.ru.