

УДК 621.643

В.З. Терских, Т.В. Зоммер, В.Л. Зоммер

ФГБОУ ВПО «МГСУ»

РАСЧЕТ ПРОСТЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Проанализировано изучение установившегося режима движения жидкости в простых трубопроводах на основе формулы Дарси. Предложен расчет параметров трубопровода при динамическом режиме движения жидкости с использованием метода передаточных функций, применяемых в теории автоматического регулирования. При этом методе требуется, чтобы происходящие процессы были описаны не только обобщенно с помощью математических формул, но и поэтапно с определением передаточных функций. В таком случае становится возможен непрерывный автоматический анализ качества работы различных трубопроводных систем. Теория автоматического регулирования позволяет представить основные зависимости в виде схемы регулирования.

Ключевые слова: формула Дарси, расчет трубопроводов, структурно-функциональная схема, теория автоматического регулирования, метод передаточных функций.

В гидравлике простой трубопровод (рис. 1) чаще всего рассчитывают на основе формулы Дарси [1]

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l V^2}{d 2g}, \quad (1)$$

где $h_{\text{дл}}$ — потери напора по длине; λ — коэффициент гидравлического трения, зависящий в основном от числа Рейнольдса и шероховатости трубопровода; l — длина трубопровода; d — диаметр трубопровода; V — средняя скорость движения жидкости; g — ускорение силы тяжести.

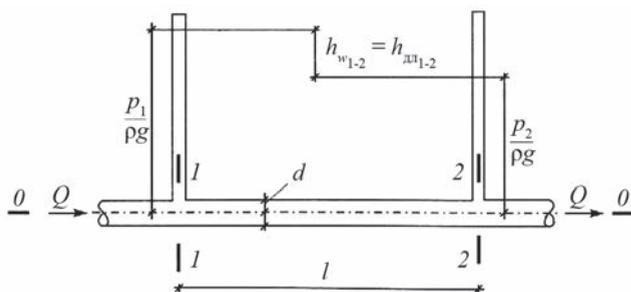


Рис. 1. Потери напора при расчете простого трубопровода

Применяемая при расчете параметров простого трубопровода определенной длины ($l = \text{const}$) формула Дарси справедлива для установившегося режима движения жидкости и может быть представлена различными вариантами.

Однако в обобщенном виде происходящие процессы могут быть описаны не только с помощью математических формул для каждого из участков трубопровода, но и с использованием методов теории автоматического регулирования (ТАР) [2—8].

В ТАР основные зависимости представляются в виде схемы регулирования с определением передаточных функций показывающих отношение выходного сигнала к входному сигналу, приходящему на элемент управления [5, 6, 9—12].

Применение ТАР позволяет проводить непрерывный автоматический анализ качества работы, в т.ч. различных трубопроводных систем [5, 6, 13]. При этом происходящие процессы должны быть описаны обобщенно и поэтапно: не только с помощью математических формул, но и с определением передаточных функций [14—16].

Допустим, в трубопровод поступает расход $Q_{\text{вх}}$, при этом некоторая часть расхода $Q_{\text{сж}}$ компенсируется сжимаемостью жидкости из-за находящегося в ней воздуха или нежесткости стенок трубопровода $Q_{\text{тр}}$ [17, 18].

Хотя для трубопроводов из мягких материалов $Q_{\text{тр}} \neq 0$, но при наличии толстых жестких стенок $Q_{\text{тр}} \approx 0$ можно исключить.

Тогда

$$Q_{\text{вх}} - Q_{\text{сж}} = Q. \quad (2)$$

Графически условия автоматического регулирования для данного случая изображены на рис. 2, а.

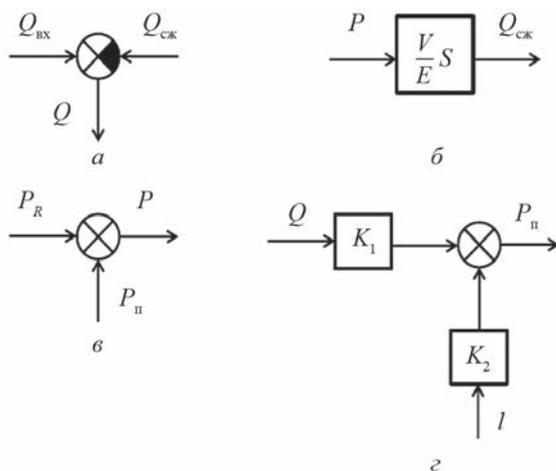


Рис. 2. Поэлементное представление движения жидкости по трубопроводу

Расход, компенсирующий сжимаемость жидкости, записывается в виде зависимости [4—6]

$$Q_{\text{сж}} = \frac{V}{E} \dot{P} = \frac{V}{E} PS, \quad (3)$$

где V — объем жидкости; E — модуль упругости жидкости; P — давление в трубопроводе; $S = \partial/\partial t$ — оператор дифференцирования.

По условиям применения ТАР зависимость (3) можно представить в виде схемы на рис. 2, б.

Величина давления P в трубопроводе обусловлена давлением p_R на выходе из трубопровода и давлением P_n , которое расходуется на потери при движении жидкости внутри трубопровода, т.е.

$$P = P_R + P_n. \quad (4)$$

Схематично выражение (4) представлено на рис. 1, в.

Давление P_n получим из уравнения Дарси

$$P_n = \gamma h_{дл}, \tag{5}$$

где γ — объемный вес жидкости.

Из выражения (1) видно, что в первом приближении h зависит от двух переменных, т.е. $h_{дл} = f(l, V)$, а параметры λ, d и g — постоянные.

Так как $V = Q/A_{тр}$, где $A = \pi d^2/4$ — площадь сечения трубопровода, то

$$P_n = f(l, Q). \tag{6}$$

Хотя зависимость (6) может быть представлена и в более сложном виде, величина давления P_n будет связана с изменениями Q и l [8, 12, 19, 20]

$$P_n = \frac{\partial P_n}{\partial Q} Q + \frac{\partial P_n}{\partial l} l = k_1 Q + k_2 l, \tag{7}$$

где k_1 — коэффициент усиления по расходу Q (при $l = \text{const}$), $k_1 = \partial P_n / \partial Q$; k_2 — коэффициент усиления по длине l трубопровода (при $Q = \text{const}$), $k_2 = \partial P_n / \partial l$.

Зависимость (7) в ТАР схематично приведена на рис. 2, з.

Итоговая структурно-функциональная схема, описывающая по условиям первого приближения движение жидкости по простому трубопроводу, представлена на рис. 3.

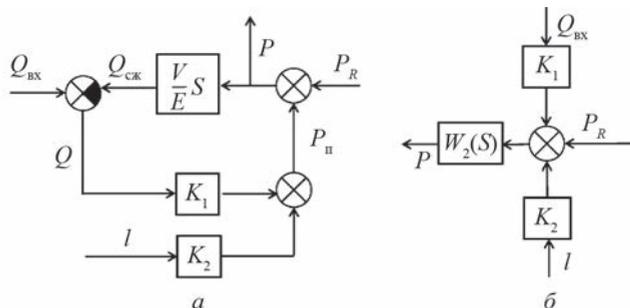


Рис. 3. Структурно-функциональная схема движения жидкости по простому трубопроводу

Согласно схеме имеются три входных параметра $Q_{вх}, P_R, l$, которые не зависят от режима движения жидкости по трубопроводу, и один выходной параметр — P . Давление P в трубопроводе зависит от параметров V, E, k_1 и k_2 .

Используя правила преобразования структурно-функциональных схем [4—6, 15, 20—22], можно получить рабочую схему (см. рис. 3, б), из которой находятся передаточные функции:

$$W_1(S) = P(S)/P_R(S) = W_1(S);$$

$$W_2(S) = P(S)/Q_{вх}(S) = k_1 W_1(S);$$

$$W_3(S) = P(S)/P_R(S) = k_2 W_1(S) \text{ и т.д.}$$

Каждая из $W_i(S)$ характеризует изменение давления P от одного из входных параметров $Q_{вх}, P_R, l$ при постоянстве других (рис. 4).

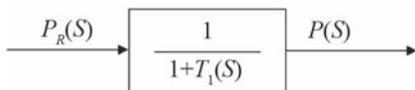


Рис. 4. Связь входного и выходного параметров: $P(S)$ и $P_R(S)$ [16]

После простых преобразований [4, 5] находим

$$W_1(S) = \frac{1}{1 + T_1(S)}, \quad (8)$$

где $T_1 = k_1 V/E$ — постоянная времени.

Вид передаточной функции $W_1(S)$ соответствует форме апериодического звена первого порядка [16], что позволяет выбирать конструктивные и гидравлические параметры трубопровода для обеспечения требуемого качества его работы. В частности при резком изменении величины давления P_R на выходе для установления нового значения давления в трубопроводе требуется некоторое время переходного процесса $t_{\text{ин}}$, численно равное $(4 \dots 5)T_1$.

Кривая переходного процесса изображена на рис. 5 и описывается выражением $P = P_R(1 - e^{-t/T_1})$.

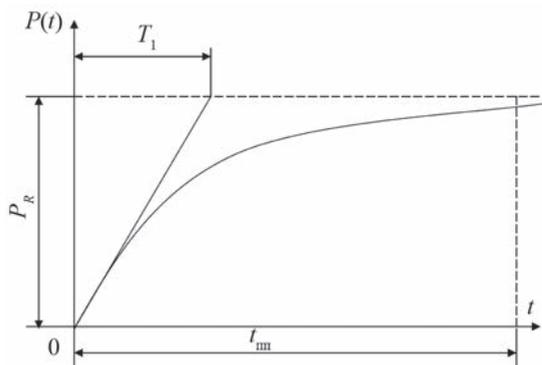


Рис. 5. Кривая переходного процесса

Передаточная функция $W_2(S)$ показывает, как изменяется давление P при изменении расхода $Q_{\text{вх}}$. А передаточная функция $W_3(S)$ характеризует зависимость давления P от длины трубопровода l . При $E = \infty$, $T_1 = 0$ и $W_1(S) = 1$.

Следует отметить, что $W_1(S)$ остается неизменной, а входные сигналы в ТАР $Q_{\text{вх}}$, P_R и l могут иметь разные варианты исполнения: единичный скачок (функция $1(t)$, которую называют функцией Хевисайда), единичный импульс (функция $\delta(t)$, которую называют дельта-функция Дирака), гармонические колебания (функция $x(t) = A \sin \omega t$), сдвинутые элементарные функции $\delta(t - \tau)$ и возмущения произвольной формы [23, 24].

Из-за разных видов входных сигналов $Q_{\text{вх}}$, P_R , l будут иметь место различные варианты изменений $W_2(S)$ и $W_3(S)$, уточнение которых требует дополнительных исследований при анализе различных конструкций трубопроводов [19].

Библиографический список

1. Ходзинская А.Г., Зоммер Т.В. Гидравлика и гидрология транспортных сооружений. М. : МГСУ, 2014. 92 с.

2. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования // Наука Москвы и регионов: Инновации. Разработки. Производство. 1972. С. 767—778.
3. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. М. : Наука, 1972. 768 с.
4. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. 4-е изд., перераб. и доп. СПб. : Профессия, 2003. 747 с.
5. *Токаренко В.М., Терских В.З., Столяров А.Л.* Гидропривод и гидрооборудование автотранспортных средств. Киев : Лыбидь, 1991. 232 с.
6. *Терских В.З.* Сравнительный анализ динамических свойств дроссельных гидроприводов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1976. № 7. С. 59—62.
7. *Боровин Г.К., Попов Д.Н.* Многокритериальная оптимизация гидросистем. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 94 с.
8. *Hu L., Mao X., Zhang L.* Robust stability and boundedness of nonlinear hybrid stochastic differential delay equations // IEEE Transactions on Automatic Control. 2013. Т. 58. № 9. С. 2319—2332.
9. *Zaripov D.I., Mikheev N.I., Dushin N.S.* A technique for simulation of a fluid flow in branched channels // Russian Aeronautics. 2013. Vol. 56. No. 1. Pp. 30—36.
10. *Brkić D.* Iterative Methods for Looped Network Pipeline Calculation // Water Resources Management. 2011. Vol. 25. No. 12. Pp. 2951—2987.
11. *Исмагилов К.В., Великанов В.С.* Разработка моделей и исследование систем автоматического управления. Магнитогорск : МГТУ, 2013. 132 с.
12. *Li Y., Zhang X., Yuan M.* Robust exponential stability and stabilization of a class of nonlinear stochastic time-delay systems // Asian Journal of Control. 2013. Vol. 15. No. 4. Pp. 1168—1177.
13. *Завьялов В.А., Величкин В.А.* Определение параметров МП регулятора по параметрам передаточной функции объекта управления // Механизация строительства. 2011. № 8. С. 22—23.
14. *Попов Д.Н.* Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1987. 464 с.
15. *Попов Д.Н., Чвялев Д.С.* Составление и исследование математической модели электрогидравлического привода для динамических испытаний арматуры железобетонных конструкций // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2006. № 6. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/58885.html>. Дата обращения: 20.03.2015.
16. *Морозенко А.А.* Синергетический подход к повышению гибкости структуры инвестиционно-строительного проекта на основе критерия устойчивости Найквиста — Михайлова // Вестник МГСУ. 2012. № 8. С. 203—206.
17. *Волгина Л.В., Тарасов В.К., Зоммер Т.В.* Влияние характеристик двухфазного потока на эффективность системы гидротранспорта // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. № 3 (23). Режим доступа: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/VolginaTarasovZommer-2012_3\(23\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/VolginaTarasovZommer-2012_3(23).pdf). Дата обращения: 20.03.2015.
18. *Волгина Л.В., Гусак Л.Н., Зоммер Т.В.* Гидравлика двухфазных потоков и гидротранспортные системы / под общ. ред. В.К. Тарасова. М. : МГСУ, 2013. 92 с.
19. *Попов Д.Н., Княжанский А.А.* О неопределенности собственной частоты дроссельного гидропривода // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 7. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/198318.html>. Дата обращения: 20.03.2015.
20. *Фихтенгольц Г.М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. 8-е изд. М. : Физматгиз, 2003. Т. 2. 864 с.

21. Ye R., Chen H., Lu R. A differential games theory based method for coordinating two-area automatic generation control // Dianli Xitong Zidonghua. 2013. Vol. 37. No. 18. Pp. 48—54, 67.

22. Гаврилов С.А., Девятков В.В., Пупырев Е.И. Логическое проектирование дискретных автоматов. М. : Наука, 1977. 352 с.

23. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф. Основы теории автоматического управления. 2-е изд., перераб. и доп. Тамбов : ТГУ, 2004. 252 с.

24. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф. Линейные системы автоматического регулирования. Тамбов : ТГУ, 2001. 264 с.

Поступила в редакцию в апреле 2015 г.

Об авторах: **Терских Владимир Захарович** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидравлики и водных ресурсов, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ZommerTV@mgsu.ru;

Зоммер Татьяна Валентиновна — преподаватель, заведующий лабораторией гидравлики, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ZommerTV@mgsu.ru;

Зоммер Виктор Леонидович — студент, лаборант кафедры гидравлики и водных ресурсов, **Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ZommerTV@mgsu.ru.

Для цитирования: *Терских В.З., Зоммер Т.В., Зоммер В.Л.* Расчет простых трубопроводов на основе теории автоматического регулирования // Вестник МГСУ. 2015. № 7. С. 105—112.

V.Z. Terskikh, T.V. Zommer, V.L. Zommer

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF A SIMPLE PIPELINE ON THE BASIS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

In most cases the parameters of a pipeline are calculated on the basis of the Darcy formula, which is true for steady-state fluid motion. However, for the study of the dynamic mode of fluid motion it is necessary to use the method of transfer functions.

In this method the processes should be described not only by using mathematical formulas. Also a phased definition of transfer functions is required. In this case, it becomes possible to perform continuous automatic analysis of the quality of various piping systems. The theory of automatic control allows presenting the basic formulas in the form of a scheme of regulation.

Key words: Darcy formula, calculation of pipelines, structural-functional diagram, theory of automatic control, the method of transfer functions.

References

1. Khodzinskaya A.G., Zommer T.V. *Gidravlika i gidrologiya transportnykh sooruzheniy* [Hydraulics and Hydrology of Transport Constructions]. Moscow, MGSU Publ., 2014, 92 p. (In Russian)

2. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of Automatic Control Systems]. *Nauka Moskvy i regionov: Innovatsii. Razrabotki. Proizvodstvo* [Science of Moscow and Regions: Innovations. Developments. Production]. 1972, pp. 767—778. (In Russian)

3. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of Automatic Control Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 768 p. (In Russian)

4. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of Automatic Control Systems]. 4th edition, revised. Saint Petersburg, Professiya Publ., 2003, 747 p. (In Russian)
5. Tokarenko V.M., Terskikh V.Z., Stolyarov A.L. *Gidroprivod i gidrooborudovanie avto-transportnykh sredstv* [Hydraulic Drive and Hydraulic Equipment of Transport]. Kiev, Lybid' Publ., 1991, 232 p. (In Russian)
6. Terskikh V.Z. Sravnitel'nyy analiz dinamicheskikh svoystv drossel'nykh gidroprivodov [Comparative Analysis of the Dynamic Features of Choke Hydraulic Drives]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 1976, no. 7, pp. 59—62. (In Russian)
7. Borovin G.K., Popov D.N. *Mnogokriterial'naya optimizatsiya gidrosistem* [Multicriteria Optimization of Hydraulic Systems]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2007, 94 p. (In Russian)
8. Hu L., Mao X., Zhang L. Robust Stability and Boundedness of Nonlinear Hybrid Stochastic Differential Delay Equations. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2013, vol. 58, no. 9, pp. 2319—2332. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TAC.2013.2256014>.
9. Zaripov D.I., Mikheev N.I., Dushin N.S. A Technique for Simulation of a Fluid Flow in Branched Channels. *Russian Aeronautics*. 2013, vol. 56, no. 1, pp. 30—36. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S1068799813010054>.
10. Brkić D. Iterative Methods for Looped Network Pipeline Calculation. *Water Resources Management*. 2011, vol. 25, no. 12, pp. 2951—2987. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-011-9784-3>.
11. Ismagilov K.V., Velikanov V.S. *Razrabotka modeley i issledovanie sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Development of Models and Investigation of Automated Control Systems]. Magnitogorsk, MGTU Publ., 2013, 132 p. (In Russian)
12. Li Y., Zhang X., Yuan M. Robust Exponential Stability and Stabilization of a Class of Nonlinear Stochastic Time-Delay Systems. *Asian Journal of Control*. 2013, vol. 15, no. 4, pp. 1168—1177. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/asjc.645>.
13. Zav'yalov V.A., Velichkin V.A. Opredelenie parametrov MP regul'yatora po parametram peredatochnoy funktsii ob'ekta upravleniya [Defining the Parameters of ME Controller Using the Parameters of Transfer Function of the Controlled Object]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva* [Mechanization of construction]. 2011, no. 8, pp. 22—23. (In Russian)
14. Popov D.N. *Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem* [Dynamics and Regulation of Hydro- and Air Systems]. 2nd edition, revised. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 464 p. (In Russian)
15. Popov D.N., Chvyalev D.S. Sostavlenie i issledovanie matematicheskoy modeli elektrogidravlicheskogo privoda dlya dinamicheskikh ispytaniy armatury zhelezobetonnykh konstruktsiy [Creation and Investigation of Mathematical Model of Hydroelectric Drive for Dynamic Tests of Concrete Structures Reinforcement]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie* [Science and Education: Electronic Science and Technical Issue]. 2006, no. 6. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/58885.html>. Date of access: 20.03.2015. (In Russian)
16. Morozenko A.A. Sinergeticheskiy podkhod k povysheniyu gibkosti struktury investitsionno-stroitel'nogo proekta na osnove kriteriya ustoychivosti Naykvista — Mikhaylova [Synergetic Approach to Improvement of the Structural Flexibility of an Investment Construction Project on the Basis of the Nyquist — Mikhailov Criterion of Stability]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012, no. 8, pp. 203—206. (In Russian)
17. Volgina L.V., Tarasov V.K., Zommer T.V. Vliyanie kharakteristik dvukhfaznogo potoka na effektivnost' sistemy gidrotransporta [Influence of Two-Phase Flow Characteristics on the Efficiency of Hydrotransport System]. *Internet-vestnik VolgGASU. Seriya: Politematicheskaya* [Internet Proceedings of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering]. 2012, no. 3 (23). Available at: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/VolginaTarasovZommer-2012_3\(23\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/VolginaTarasovZommer-2012_3(23).pdf). Date of access: 20.03.2015. (In Russian)
18. Volgina L.V., Gusak L.N., Zommer T.V. *Gidravlika dvukhfaznykh potokov i gidrotransportnye sistemy* [Hydraulics of Two-Phase Flows and Hydrotransport Systems]. Moscow, MGSU Publ., 2013, 92 p. (In Russian)

19. Popov D.N., Knyazhanskiy A.A. O neopredelennosti sobstvennoy chastoty drossel'nogo gidroprivoda [On the indeterminacy of Eigen Frequency of Choke Hydraulic Drives]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie* [Science and Education: Electronic Science and Technical Issue]. 2011, no. 7. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/198318.html>. Date of access: 20.03.2015. (In Russian)

20. Fikhtengol'ts G.M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya* [Course of Differential and Integral Calculation]. 8th edition. Moscow, Fizmatgiz Publ., 2003, vol. 2, 864 p.

21. Ye R., Chen H., Lu R. A Differential Games Theory Based Method for Coordinating Two-Area Automatic Generation Control. *Automation of Electric Power Systems*. 2013, vol. 37, no. 18, pp. 48—54, 67.

22. Gavrilov S.A., Devyatov V.V., Pupyrev E.I. *Logicheskoe proektirovanie diskretnykh avtomatov* [Logic Design of Discrete Automation]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 352 p. (In Russian)

23. Lazareva T.Ya., Martem'yanov Yu.F. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Fundamentals of Automatic Control Theory]. 2nd edition, revised. Tambov, TGU Publ., 2004, 252 p. (In Russian)

24. Lazareva T.Ya., Martem'yanov Yu.F. *Lineynye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya* [Linear Systems of Automatic Control]. Tambov, TGU Publ., 2001, 264 p. (In Russian)

About the authors: **Tersikh Vladimir Zakharovich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Hydraulics and Water Resources, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ZommerTV@mgsu.ru;

Zommer Tat'yana Valentinovna — Lecturer, head, Laboratory of Hydraulics, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ZommerTV@mgsu.ru;

Zommer Viktor Leonidovich — student, laboratory assistant, Department of Hydraulics and Water Resources, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ZommerTV@mgsu.ru.

For citation: Tersikh V.Z., Zommer T.V., Zommer V.L. Raschet prostykh truboprovodov na osnove teorii avtomaticheskogo regulirovaniya [Determination of the Parameters of a Simple Pipeline on the Basis of the Theory of Automatic Control]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 7, pp. 105—112. (In Russian)