

Оптимизация параметров технологического трубопровода по технико-экономическим показателям

Анатолий А. Хвостов	¹	khvtol1974@yandex.ru	 0000-0002-3836-9404
Магомед Г. Магомедов	²	mmg@inbox.ru	 0000-0003-2494-4973
Алексей А. Журавлев	¹	zhuraa1@rambler.ru	 0000-0002-2194-767X
Елена А. Шипилова	¹	elen_ship@list.ru	 0000-0003-1050-036X
Олег А. Семенихин	³	semenihin72@yandex.ru	 0000-0002-2611-0297
Анатолий А. Никитченко	¹	nik.to77@mail.ru	 0000-0002-0039-1449

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54 А, г. Воронеж, 394064, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

³ Воронежский государственный технический университет, Московский пр., 14, г. Воронеж, 394026, Россия

Аннотация. В пищевой и химической промышленности проектирование новых технологических трубопроводов и модернизация действующих трубопроводных систем транспортирования сырья, полуфабрикатов и готовой продукции представляет собой комплексную организационно-техническую задачу, одним из этапов которой является проведение необходимых гидравлических расчетов. Общепринятым в отечественной и зарубежной практике является гидравлический расчет трубопроводных линий на основании уравнения неразрывности потока и уравнения Бернулли для реальной вязкой жидкости, которое учитывает потери давления на трение и на преодоление местных сопротивлений трубопровода. При таком подходе гидравлический расчет является многовариантной задачей, т.к. существует бесконечное множество сочетаний параметров диаметр трубопровода - перепад давления, неравноценных как с экономической, так и технической позиций. На основании анализа литературных источников в работе показана целесообразность проведения гидравлического расчета трубопроводных линий по технико-экономическим показателям. В качестве критерия технико-экономической оптимизации технологических трубопроводов предложены суммарные годовые затраты на создание и эксплуатацию технологического трубопровода, являющиеся линейной суперпозицией капитальных и эксплуатационных затрат. В работе предложены расчетные соотношения для определения оптимального диаметра технологического трубопровода из условия минимизации суммарных годовых затрат на его создание и эксплуатацию с учетом текущих цен и тарифов на трубопровод и электроэнергию, трассировки трубопровода, условий его работы, а также свойств транспортируемой среды. На примере гидравлической установки для перекачивания патоки проведены вычислительные эксперименты по оценке влияния диаметра трубопровода и массового расхода транспортируемой среды на технико-экономические показатели технологического трубопровода и определены его оптимальные параметры. Для приближенной оценки эффективности оптимизационных мероприятий предложен критерий, позволяющий сопоставить суммарные годовые затраты на создание и эксплуатацию технологических трубопроводов с оптимальными и отличными от них параметрами.

Ключевые слова: технологический трубопровод, технико-экономическая оптимизация, потери давления, критерий оптимизации, гидравлический расчет

Optimization of process pipeline parameters by techno-economic parameters

Anatoly A. Khvostov	¹	khvtol1974@yandex.ru	 0000-0002-3836-9404
Magomed G. Magomedov	²	mmg@inbox.ru	 0000-0003-2494-4973
Alexei A. Zhuravlev	¹	zhuraa1@rambler.ru	 0000-0002-2194-767X
Elena A. Shipilova	¹	elen_ship@list.ru	 0000-0003-1050-036X
Oleg A. Semenikhin	³	semenihin72@yandex.ru	 0000-0002-2611-0297
Anatoly A. Nikitchenko	¹	nik.to77@mail.ru	 0000-0002-0039-1449

¹ Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh), Staryh Bolshevikov street, 54 A Voronezh, 394064, Russia

² Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

³ Voronezh State Technical University, Moscow Av., 14 Voronezh, 394026, Russia

Для цитирования

Хвостов А.А., Магомедов М.Г., Журавлев А.А., Шипилова Е.А., Семенихин О.А., Никитченко А.А. Оптимизация параметров технологического трубопровода по технико-экономическим показателям // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 1. С. 34–46. doi:10.20914/2310-1202-2020-1-34-46

For citation

Khvostov A.A., Magomedov M.G., Zhuravlev A.A., Shipilova E.A., Semenikhin O.A., Nikitchenko A.A. Optimization of process pipeline parameters by techno-economic parameters. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 1. pp. 34–46. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-1-34-46

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abstract. In the food and chemical industry, the design of new process pipelines and modernization of existing pipeline systems for transportation of raw materials, semi-finished products and finished products is a complex organizational and technical task, one of the stages of which is to carry out the necessary hydraulic calculations. It is common practice in domestic and foreign practices to hydraulically calculate pipeline lines based on the flow intricacy equation and the Bernoulli equation for a real viscous liquid, which takes into account pressure losses on friction and on overcoming local pipeline resistances. With this approach, hydraulic calculation is a multivariate task, as there are infinite combinations of pipeline diameter - differential pressure parameters, unequal from both economic and technical positions. Based on the analysis of literary sources, the work shows the expediency of carrying out hydraulic calculation of pipeline lines according to techno-economic indicators. Total annual costs for creation and operation of the process pipeline, which are a linear superposition of capital and operating costs, are proposed as a criterion for technical and economic optimization of process pipelines. The work proposes design ratios for determining the optimum diameter of the process pipeline based on the condition of minimization of the total annual costs for its creation and operation taking into account the current prices and tariffs for the pipeline and electric power, routing of the pipeline, conditions of its operation, as well as properties of the transported medium. On the example of hydraulic plant for pumping of molasses, computational experiments were carried out to assess the influence of pipeline diameter and mass flow rate of transported medium on technical and economic indices of process pipeline and its optimal parameters were determined. In order to estimate the efficiency of optimization measures, the criterion is proposed, which allows to compare the total annual costs for creation and operation of process pipelines with optimal and different parameters.

Keywords: process pipeline, techno-economic optimization, pressure loss, optimization criterion, hydraulic calculation

Введение

При создании предприятий пищевой промышленности одним из наиболее важных и сложных этапов является проектирование и расчет технологических трубопроводов. На выполнение этого этапа затрачивается до 30–35% от общих затрат на разработку технологической и монтажно-технологической частей проекта.

С позиций системного анализа технологические трубопроводы представляют собой функциональную подсистему, в которой осуществляются взаимосвязанные между собой гидравлические, тепловые и механические процессы и явления, интегрированную в общую химико-технологическую систему и обеспечивающую практическую взаимосвязь между отдельными единицами технологического оборудования [1].

Основными элементами системы технологических трубопроводов являются технологические трубопроводы, машины для создания разности давлений (насосы, компрессоры) и технологические резервуары [2].

Технологические трубопроводы классифицируют по различным признакам: виду транспортируемой среды, материалу, применяемому для изготовления, длине, величине давления, функциональному назначению, наличию и типа тепловой изоляции, способу прокладки [1, 2].

Проектирование новых технологических трубопроводов и модернизация действующих трубопроводных систем представляет собой комплексную организационно-техническую задачу [1], одним из этапов которой является проведение гидродинамических расчетов на основе уравнений неразрывности и Навье-Стокса, дополненных уравнениями конвективной теплопроводности и состояния движущейся среды, что представляет известные трудности.

Используя допущения об изотермичности, стационарности и несжимаемости потока движущейся среды, задачу в исходной постановке

сводят к проведению гидравлических расчетов по уравнению неразрывности потока и уравнению Бернулли для реальной вязкой жидкости, которое учитывает потери давления на трение и на преодоление местных сопротивлений трубопровода. Данный подход является общепринятым в отечественной и зарубежной практиках при проведении гидравлических расчетов технологических трубопроводов пищевых и химических производств и охватывает решение трех практических задач: определение диаметра трубопровода, определение перепада давления в трубопроводе и оценка его пропускной способности [2, 3].

Для расчета технологических трубопроводов транспортировки не-newтоновских пищевых сред традиционные методики уточнены эмпирическими соотношениями, позволяющими учесть аномалию вязкости перекачиваемого продукта [4, 5].

Гидравлические расчеты сложных трубопроводов с разветвлениями, кольцами, участками разного диаметра и пр. проводят с использованием методов теории графов и электрогидравлической аналогии [1, 6].

Возможности численного моделирования трубопроводных систем сложной структуры позволяют рассматривать тепломассообменные, химические и биохимические процессы, протекающие в трубопроводных системах, взаимосвязанными, моделировать режимы работы и выбирать оптимальные конструктивные и эксплуатационные параметры [7–12].

Одной из задач при традиционном гидравлическом расчете является задача определения диаметра трубопровода и потерь давления в линии заданной трассировки при постоянном объемном расходе [2].

При таком подходе гидравлический расчет является многовариантной задачей, т. к. существует бесконечное множество сочетаний параметров диаметр трубопровода – перепад давления, обеспечивающих перекачивание транспортируемой среды с заданным расходом.

Причем варианты неравноценны как с экономической, так и технической точки зрения.

Так, с одной стороны, при уменьшении диаметра трубопровода снижается его стоимость и металлоемкость (т. е. капитальные затраты), но, при заданном расходе жидкости, увеличивается скорость ее течения, и, как следствие, возрастают потери давления на ее перекачивание по трубопроводу. Для создания более высокого давления в трубопроводе требуется установка более мощного гидравлического насоса, потребляющего больше электроэнергии. Следовательно, снижение капитальных затрат на создание трубопроводной системы путем уменьшения диаметра трубопровода приводит к удорожанию стоимости насосной установки и затрат на эксплуатацию трубопроводной системы.

С другой стороны, транспортирование жидкости по более дорогому трубопроводу, изготовленному из труб большего диаметра, требует меньших затрат электроэнергии на привод насосной установки.

В этой связи выбор диаметра трубопровода должен быть обоснован как технически, так и экономически. Очевидно, существует некий оптимальный диаметр трубопровода, при котором сумма затрат на сооружение технологического трубопровода и перекачивания по нему жидкости будет минимальной.

Для решения такой задачи оптимизации предложено большое количество технико-экономических критериев, отличающихся друг от друга сложностью, детализацией и количеством учитываемых экономических и технологических показателей. Однако общим для всех критериев является учет эксплуатационных затрат, связанных с затратами на электроэнергию для привода насоса (затраты на создание перепада давления) и капитальных затрат, обусловленных стоимостью трубопровода [13, 14].

В качестве примера можно отметить работы [15–18], где в качестве критерия оптимизации использован показатель совокупных дисконтированных затрат. В работах [19–21] приведена оптимизация параметров трубопровода по затратам электроэнергии на привод насоса. При оптимизации параметров криогенных трубопроводов в качестве критериев оптимизации авторы [22, 23] использовали мощности гидравлических и тепловых потерь. Использование метода исследования пространства параметров (МПП) позволило авторам найти Парето-оптимальное решение. Для минимизации материальных затрат на воздухопроводы вентиляционных систем авторами [24–26] использовано динамическое программирование, позволившее последовательно определить оптимальные диаметры

участков вентиляционной системы для заданных значений давлений и расходов воздуха. В работе [27] предложен выбор оптимального диаметра трубопровода для сети централизованного теплоснабжения, состоящей из ответвлений и колец, с использованием теории графов и минимизации затрат.

В этой связи актуальной является задача определения оптимального диаметра и потерь давления в трубопроводе, обеспечивающих одновременно снижение стоимости трубопровода и затрат электроэнергии для привода насоса.

Объекты и методы

В качестве критерия технико-экономической оптимизации (ТЭО) используем суммарные годовые затраты F , р./год на создание и эксплуатацию технологического трубопровода, являющиеся линейной суперпозицией капитальных K , р., и эксплуатационных \mathcal{E} , р., затрат [13, 14]

$$F = K + \mathcal{E}. \quad (1)$$

Капитальные затраты K , р./год, в первом приближении, представим как затраты на создание трубопровода, пропорциональные его габаритным размерам, прейскурантной цене и отнесенные к одному году эксплуатации трубопровода

$$K = f_{mp}(D)L, \quad (2)$$

где L – общая длина трубопровода (включает в себя длину всех горизонтальных и вертикальных участков), м; $f_{mp}(D)$ – регрессионное уравнение, аппроксимирующее прейскурантные данные по стоимости трубопровода в зависимости от его диаметра. Величина $f_{mp}(D)$ является стоимостью 1 погонного метра трубопровода диаметром D и толщиной стенки трубы δ , мм.

В качестве аппроксимирующей функции $f_{mp}(D)$ в [1] рекомендуется линейная зависимость

$$f_{mp}(D) = aD, \quad (3)$$

где a – регрессионный коэффициент, р./м²; D диаметр трубопровода, м.

С учетом (3) капитальные затраты по формуле (2) представим в виде

$$K = S_D D, \quad (4)$$

где S_D – удельные затраты, р./м

$$S_D = aL. \quad (5)$$

Эксплуатационные затраты \mathcal{E} , р./год, на эксплуатацию трубопровода в течение календарного года представляют собой затраты на перемещение среды по трубопроводу и пропорциональны количеству электроэнергии, потребленной

насосом за время его работы в течение года и тарифной стоимости 1 кВт·ч электроэнергии

$$\mathcal{E} = 365 N_{эл} c_{эл} \tau, \quad (6)$$

где $N_{эл}$ – мощность электродвигателя привода насоса, кВт; $c_{эл}$ – тариф (стоимость) 1 кВт·ч электроэнергии, руб./кВт·ч; τ – продолжительность работы трубопроводной установки в течение суток, ч.

Мощность электродвигателя привода насоса

$$N = K_3 \frac{Q \Delta P}{1000 \eta}, \quad (7)$$

где K_3 – коэффициент запаса мощности электродвигателя $K_3 = 1,2$; Q – объемный расход транспортируемой среды, м³/с; ΔP – давление, развиваемое насосом, Па; η – КПД привода насоса (учитывает механический КПД, утечки через зазоры и сальники насоса, износ и пр.), $\eta = 0,8$.

С учетом (7) эксплуатационные затраты по формуле (6) представим в виде

$$\mathcal{E} = S_p \Delta P, \quad (8)$$

где S_p – удельные затраты для создания единицы перепада давления, руб./кПа

$$S_p = \frac{365 K_3 Q c_{эл} \tau}{\eta}. \quad (9)$$

С учетом затрат (4) и (9) критерий оптимизации по формуле (1) примет вид [28]

$$F = S_p \Delta P + S_D D. \quad (10)$$

В критерии (10) давление ΔP , развиваемое насосом, представляет собой потери давления в технологическом трубопроводе, зависящие от его топологии, наличия гидравлических сопротивлений, объемного расхода транспортируемой жидкости и ее свойств, а также диаметра трубопровода [2]. Таким образом, критерий ТЭО (10) учитывает текущие значения цен и тарифов на трубопровод и электроэнергию, параметры трубопровода, условия транспортирования жидкости, ее свойства и отвечает основным требованиям, предъявляемым к критериям оптимизации [1]: измеряет эффективность системы; является количественным; имеет ясный физический смысл и достаточно полно отражает наиболее существенные стороны процесса.

Задача технико-экономической оптимизации технологического трубопровода заданной топологии заключается в нахождении таких значений D и ΔP , при которых критерий ТЭО (10) достигает минимального значения при заданном объемном расходе транспортируемой среды Q ,

который, в свою очередь, также зависит от D и ΔP [31]:

$$F(\Delta P, D) = S_p \Delta P + S_D D \xrightarrow{\Delta P, D} \min, \quad (11)$$

$$Q(\Delta P, D) = \text{const}. \quad (12)$$

Таким образом, имеем задачу условной оптимизации критерия (11) при наличии ограничения (уравнения связи) вида (12). Для решения задачи в постановке (11) и (12) необходимо свести ее к задаче на безусловный экстремум.

Уравнение связи (12) должно в явном виде связывать потери давления ΔP , диаметр трубопровода D и объемный расход Q транспортируемой среды.

Представим связь между ΔP и D в виде уравнения

$$\Delta P = \Delta P_{лин} + \Delta P_{мс} \pm \Delta P_{zc}, \quad (13)$$

где $\Delta P_{лин}$ – потери давления по длине трубопровода, Па; $\Delta P_{мс}$ – потери давления, обусловленные наличием местных сопротивлений, Па; ΔP_{zc} – гидростатические потери давления, связанные с изменением высоты подъема (опускания) транспортируемой среды, Па.

Потери давления по длине трубопровода определим по формуле Дарси-Вейсбаха

$$\Delta P_{лин} = \lambda \frac{L_z + L_6}{D} \cdot \frac{\vartheta^2 \rho}{2}, \quad (14)$$

где λ – коэффициент трения; L_z , L_6 – соответственно, длина горизонтального и вертикального участков трубопровода, м; ϑ – средняя скорость движения транспортируемой среды в трубопроводе, м/с; ρ – плотность среды, кг/м³; D – диаметр трубопровода, м.

Потери давления, обусловленные наличием местных сопротивлений, определим по формуле Вейсбаха

$$\Delta P_{мс} = \sum \xi_{мс} \frac{\vartheta^2 \rho}{2}, \quad (15)$$

где $\xi_{мс}$ – коэффициент местного сопротивления.

Гидростатические потери давления определим по формуле

$$\Delta P_{zc} = \pm \rho g L_6, \quad (16)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

С учетом формул (14)–(16) имеем

$$\Delta P = \lambda \frac{L_z + L_6}{D} \cdot \frac{\vartheta^2 \rho}{2} + \sum \xi_{мс} \frac{\vartheta^2 \rho}{2} \pm \rho g L_6. \quad (17)$$

Уравнение (17) не содержит в явном виде величину объемного расхода Q . Для приведения этого уравнения к виду (12), представим

среднюю скорость движения транспортируемой среды в трубопроводе круглого сечения через его диаметр D :

$$g = \frac{4Q}{\pi D^2}. \quad (18)$$

В условиях ламинарного режима течения значение коэффициента трения λ зависит от величины числа Рейнольдса Re

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (19)$$

которое определяется как

$$Re = \frac{gD\rho}{\mu}, \quad (20)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости транспортируемой среды, Па·с.

С учетом формул (18) – (20) уравнение (17) принимает вид

$$\Delta P = \frac{8\rho Q^2}{\pi^2 D^4} \left(\frac{16\mu\pi}{\rho Q} (L_z + L_g) + \sum \xi_{mc} \right) \pm \rho g L_g \quad (21)$$

Уравнение связи (21) позволяет определить оптимальные значения D и ΔP , при которых критерий оптимизации (1) достигает минимального значения при заданном объемном расходе

$$\Delta P^* = \frac{1}{2} \left[\frac{\rho Q^2}{\pi^2} \left(\frac{16\mu\pi}{\rho Q} (L_z + L_g) + \sum \xi_{mc} \right) \left(\frac{S_D}{S_P} \right)^4 \right]^{0.2} \pm \rho g L_g. \quad (26)$$

Подстановка оптимальных значений ΔP^* и D^* в критерий оптимизации (1) позволяет рассчитать минимальное значение суммарных затрат на сооружение трубопровода заданной трассировки и транспортирование среды с заданными расходом и свойствами.

На рисунке 1 представлена геометрическая интерпретация задачи оптимизации технологического трубопровода. В пространстве $(F; \Delta P; D)$ представлена плоскость целевой функции (1), уравнение связи (13) для $Q = \text{const}$ и кривая, образованная сечением плоскости (1) цилиндрической поверхностью с основанием (13).

Точка A' с координатами $(\Delta P^*; D^*)$ является проекцией точки $A(F_{\min}; \Delta P^*; D^*)$ минимального значения критерия оптимизации (в данной точке одновременно выполняются условия (11) и (12), т. е. достигается условный экстремум критерия оптимизации (1).

транспортируемой среды Q . Необходимое условие минимизации критерия (1) имеет вид [1, 31]

$$\frac{dF}{dD} = S_P \frac{d\Delta P}{dD} + S_D = 0. \quad (22)$$

Решением уравнения (22) является оптимальное значение диаметра трубопровода, которое в дальнейшем используется для определения оптимальных потерь давления по уравнению (21).

Дифференцируя (21) по диаметру D , получим

$$\frac{d\Delta P}{dD} = - \frac{32\rho Q^2}{\pi^2 D^5} \left(\frac{16\mu\pi}{\rho Q} (L_z + L_g) + \sum \xi_{mc} \right). \quad (23)$$

Подставляя (23) в (22), приходим к уравнению

$$- \frac{32\rho Q^2}{\pi^2 D^5} \left(\frac{16\mu\pi}{\rho Q} (L_z + L_g) + \sum \xi_{mc} \right) S_P + S_D = 0. \quad (24)$$

Решая уравнение (24) относительно D и исключая комплексные корни, получим оптимальное значение диаметра трубопровода

$$D^* = 2 \left[\frac{\rho Q^2}{\pi^2} \left(\frac{16\mu\pi}{\rho Q} (L_z + L_g) + \sum \xi_{mc} \right) \frac{S_P}{S_D} \right]^{0.2} \quad (25)$$

Подстановка решения (25) в уравнение связи (21) позволяет определить оптимальное значение потерь давления в трубопроводе

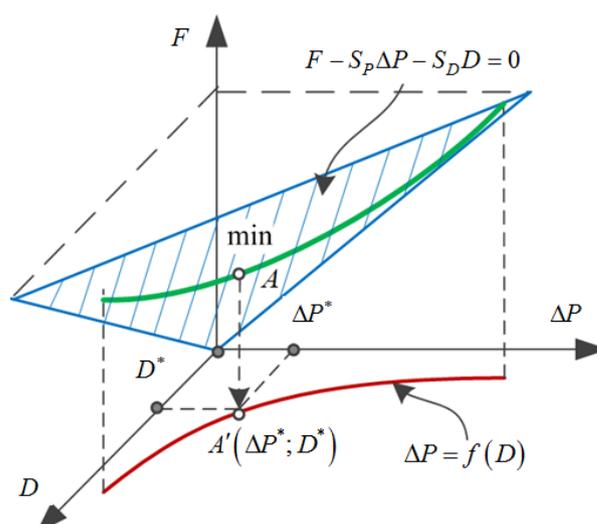


Рисунок 1. Графическая интерпретация задачи оптимизации

Figure 1. Graphical interpretation of the optimization task

Результаты и обсуждение

Обсуждаемую методику оптимизации параметров технологического трубопровода по технико-экономическим показателям проиллюстрируем вычислительными экспериментами на примере гидравлической установки для транспортирования патоки, используемой в кондитерском производстве (рисунок 2).

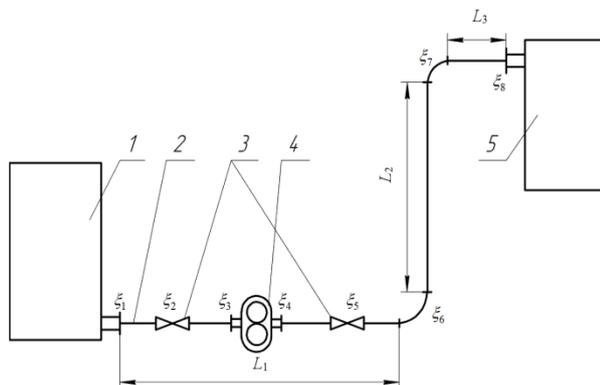


Рисунок 2. Схема установки: 1 – расходная емкость; 2 – трубопровод; 3 – регулировочный вентиль; 4 – насос; 5 – производственная емкость

Figure 2. Installation diagram: 1 – consumption capacity; 2 – pipeline; 3 – adjusting valve; 4 – pump; 5 – production capacity

Технологический трубопровод состоит из двух горизонтальных участков длиной, соответственно, $L_1 = 20$ м и $L_3 = 2$ м и вертикального участка длиной $L_2 = 8$ м. Суммарная длина горизонтальных участков $L_e = 22$ м, длина вертикального участка $L_s = 8$ м. Трубопровод содержит местные сопротивления, значения которых представлены в таблице 1.

Для изготовления технологического трубопровода используем трубы электросварные из пищевой нержавеющей стали марки 1 2 x 18Н10Т (зарубежный аналог AISI 304) по ГОСТ 11068–81 «Трубы электросварные из коррозионно-стойкой стали». По прейскурантным ценам методом наименьших квадратов получены значения регрессионного коэффициента a , руб./м², аппроксимирующей функция (3) (таблица 2).

В качестве модельной среды для транспортирования используем патоку с массовой долей редуцирующих веществ 52,7% с температурой $t = 40$ °С. При данной температуре плотность и коэффициент динамической вязкости патоки равны, соответственно, $\rho = 1430$ кг/м³ и $\mu = 9,9$ Па·с [29].

Вычислительный эксперимент № 1. Заключался в оценке влияния диаметра трубопровода на технико-экономические показатели и определении оптимальных параметров трубопровода для перекачивания патоки с массовым расходом $M = 100$ кг/ч (объемный расход $Q = 1,943 \cdot 10^{-5}$ м³/с).

Таблица 1. Значения коэффициентов местных сопротивлений [2]

Table 1.
Values of local resistance coefficients [2]

Местное сопротивление Local resistance	Значение Value
Вход в трубу Entrance to a pipe	$\xi_1 = 0,5$
Вентиль Valve	$\xi_2 = 4,0$
Внезапное расширение Sudden expansion	$\xi_3 = 0,64$
Внезапное сужение Sudden constriction	$\xi_4 = 0,64$
Вентиль Valve	$\xi_5 = 4,0$
Колено (поворот на 90 град.) Elbow (90 degree rotation)	$\xi_6 = 1,3$
Колено (поворот на 90 град.) Elbow (90 degree rotation)	$\xi_7 = 1,3$
Выход из трубы Escaping of a pipe	$\xi_8 = 1,0$

Таблица 2. Значение регрессионного коэффициента a аппроксимирующей функции (3)

Table 2.
Value of regression coefficient a of approximation function (3)

Диаметр трубы D , мм Pipe diameter D , mm	Толщина стенки трубы δ , мм Thickness of a wall of the pipe δ , mm	Коэффициент a , руб./м ² Coefficient a , rubles/m ²
6,0 ÷ 20	1,0	$8,525 \cdot 10^3$
12,0 ÷ 101,6	1,5	$10,3 \cdot 10^3$
12,0 ÷ 304,0	2,0	$13,641 \cdot 10^3$
21,3 ÷ 323,9	3,0	$18,857 \cdot 10^3$
76,1 ÷ 406,4	4,0	$28,044 \cdot 10^3$

В ходе вычислительного эксперимента значение диаметра трубопровода варьировали в интервале от 0,05 до 0,1 м с последующим вычислением технико-экономических показателей.

Зависимость потерь давления ΔP в трубопроводе от его диаметра D , вычисленная по формуле (21), представлена на рисунке 3.

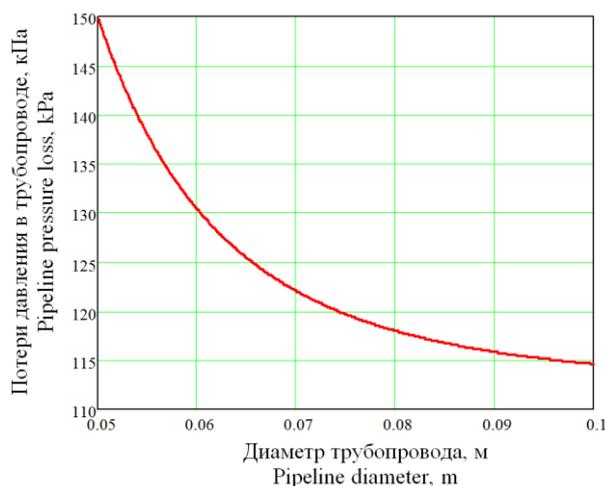


Рисунок 3. Зависимость потерь давления в трубопроводе от его диаметра

Figure 3. Dependence of pressure losses in the pipeline on its diameter

Гидравлическая линия проектируется на основе электросварных труб из пищевой нержавеющей стали марки 12 x 18Н10Т, толщина стенки $\delta = 1,5$ мм, значение регрессионного коэффициента $a = 10,3 \cdot 10^3$ р./м² (таблица 2). Удельные капитальные затраты по формуле (5) составят $S_D = 3,09 \cdot 10^5$ р./м.

Коэффициент запаса мощности электродвигателя и КПД привода насоса приняты, соответственно $K_s = 1,2$ и $\eta = 0,8$. Продолжительность работы установки в течение суток $\tau = 8$ ч. Тарифная стоимость 1 кВт·ч электроэнергии (для Воронежской области, декабрь 2019 г.) составляет $c_{эл} = 3,74$ р./кВт·ч. Удельные эксплуатационные затраты по формуле (9) равны $S_P = 0,318$ р. / Па.

На рисунке 4 представлены зависимости капитальных, эксплуатационных и суммарных годовых затрат от диаметра трубопровода, рассчитанных, соответственно, по формулам (4), (8) и (10). Как следует из данных рисунка 4, увеличение диаметра трубопровода приводит к возрастанию капитальных затрат (кривая 1) на создание трубопроводной системы для транспортирования патоки при одновременном снижении эксплуатационных затрат (кривая 2) на транспортирование продукта. Экстремальный характер кривой 3 указывает на существование значения диаметра трубопровода, который обеспечивает создание и эксплуатацию гидравлической установки для транспортирования патоки с минимальными суммарными затратами. Вычисления по формулам (17) и (18) дают оптимальные значения диаметра трубопровода $D^* = 0,063$ м и потерь давления $\Delta P^* = 1,27 \cdot 10^5$ Па,

при которых суммарные годовые затраты на сооружение и эксплуатацию трубопровода минимальны $F^* = 5,993 \cdot 10^4$ р./год.

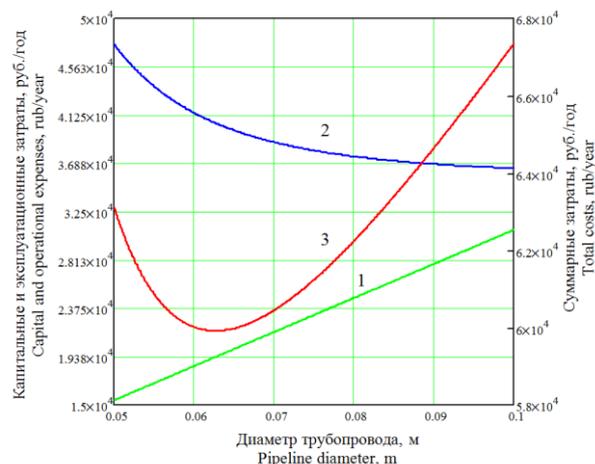


Рисунок 4. Зависимость капитальных (1), эксплуатационных (2) и суммарных годовых затрат (3) на сооружение и эксплуатацию трубопровода в зависимости от его диаметра

Figure 4. Dependence of capital (1), operating (2) and total annual costs (3) for pipeline construction and operation depending on its diameter

Рассчитанное оптимальное значение диаметра трубопровода следует скорректировать по сортаменту труб, согласно ГОСТ 11068–81 «Трубы электросварные из коррозионно-стойкой стали» с последующим уточнением капитальных, эксплуатационных и суммарных годовых затрат.

Вычислительный эксперимент № 2. Заключался в оценке влияния массового расхода (объемного расхода) перекачиваемой патоки на технико-экономические показатели и оптимальные параметры трубопровода.

Расчет проведен для значений массового расхода $M_1 = 100$ кг/ч, $M_2 = 150$ кг/ч и $M_3 = 200$ кг/ч (объемный расход, соответственно, $Q_1 = 1,943 \cdot 10^{-5}$ м³/с, $Q_2 = 2,914 \cdot 10^{-5}$ м³/с и $Q_3 = 3,885 \cdot 10^{-5}$ м³/с). В ходе вычислительного эксперимента значение диаметра трубопровода варьировали в интервале от 0,05 до 0,1 м с последующим вычислением технико-экономических показателей.

Для электросварной трубы со стенкой толщиной $\delta = 1,5$ мм значение регрессионного коэффициента $a = 10,3 \cdot 10^3$ р./м² (таблица 2). Удельные капитальные затраты по формуле (5) составят $S_D = 3,09 \cdot 10^5$ р./м. Капитальные затраты, в соответствии с формулой (4), не зависят от массового расхода продукта и определяются только диаметром трубопровода (рисунок 4, кривая 1).

Потери давления ΔP в трубопроводе вычислялись по формуле (21). Расчет удельных эксплуатационных затрат выполнен по формуле (9) с исходными данными $K_3 = 1,2$ и $\eta = 0,8$, $\tau = 8$ ч и $c_{эл} = 3,74$ р./кВт·ч. Эксплуатационные затраты рассчитывались по формуле (8). На рисунке 5 показаны зависимости затрат на эксплуатацию трубопровода от его диаметра для заданных значений массовых расходов патоки.

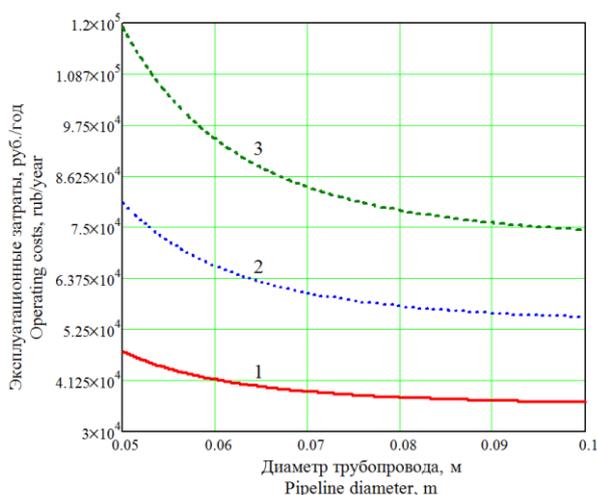


Рисунок 5. Влияние диаметра трубопровода на эксплуатационные затраты при транспортировании патоки в количестве: 1 – 100 кг/ч; 2 – 150 кг/ч; 3 – 200 кг/ч

Figure 5. Influence of the pipeline diameter on the operating costs in the transporting of molasses in the amount of: 1 – 100 kg/h; 2 – 150 kg/h; 3 – 200 kg/h

Как следует из данных рисунка 5, увеличение диаметра трубопровода при постоянном массовом расходе продукта приводит к снижению эксплуатационных затрат что связано с уменьшением потерь давления в гидравлической линии. Однако темп снижения затрат на эксплуатацию трубопровода не постоянен и зависит от массового расхода продукта. Так, при массовом расходе патоки $M_1 = 100$ кг/ч увеличение диаметра в 2 раза

способствует снижению эксплуатационных затрат примерно на $1,3 \cdot 10^4$ р. год; при массовом расходе $M_3 = 200$ кг/ч аналогичное увеличение диаметра приводит к уменьшению затрат на транспортировку патоки на $4,5 \cdot 10^4$ р. год.

Влияние диаметра трубопровода и массового расхода транспортируемой патоки на суммарные годовые затраты, вычисленные по формуле (10), показано на рисунке 6.

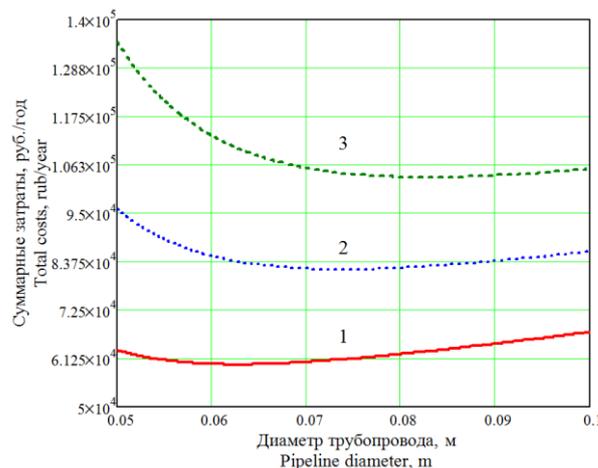


Рисунок 6. Влияние диаметра трубопровода на суммарные годовые затраты при транспортировании патоки в количестве: 1 – 100 кг/ч; 2 – 150 кг/ч; 3 – 200 кг/ч

Figure 6. Influence of the pipeline diameter on the operating costs in the transporting of molasses in the amount of: 1 – 100 kg/h; 2 – 150 kg/h; 3 – 200 kg/h

Данные рисунка 6 свидетельствуют о существовании значения диаметра трубопровода (при постоянном значении массового расхода), при котором суммарные годовые затраты на создание и эксплуатацию технологического трубопровода достигают своего минимума. Оптимальные значения диаметра трубопровода и потерь давления для заданных массовых расходов патоки вычислены по формулам (17), (18) и представлены в таблица 3.

Таблица 3.

Технико-экономические показатели трубопровода оптимального диаметра

Table 3.

Technical and economic indices of the pipeline of optimal diameter

Массовый расход M , кг/ч Mass flow M , kg/h	Диаметр D^* , м Diameter D^* , m	Потери давления ΔP^* , Па Pressure loss ΔP^* , Pa	Капитальные затраты K , р./год Capital expenditures K , rubles/year	Эксплуатационные затраты \mathcal{E} , р./год Operational costs \mathcal{E} , rubles/year	Суммарные затраты F^* , р./год Total costs F^* , rubles/year
100	0,063	$1,27 \cdot 10^5$	$1,937 \cdot 10^4$	$4,055 \cdot 10^4$	$5,993 \cdot 10^4$
150	0,073	$1,242 \cdot 10^5$	$2,278 \cdot 10^4$	$5,926 \cdot 10^4$	$8,204 \cdot 10^4$
200	0,083	$1,222 \cdot 10^5$	$2,556 \cdot 10^4$	$7,781 \cdot 10^4$	$1,034 \cdot 10^5$

Эффективность оптимизационных мероприятий ориентировочно оценим по показателю эффективности $K_{эф}$, %, который можно интерпретировать как "степень крутизны" зависимости $F = f(D, M)$ между двумя значениями суммарных затрат:

$$K_{эф} = \left| \frac{F^* - F^{\max}}{F^*} \right| 100 \quad (27)$$

где F^* – значение суммарных затрат при оптимальном значении диаметра трубопровода D^* и заданном значении массового расхода патоки M ; F^{\max} – наибольшее значение суммарных затрат, соответствующее неоптимальному значению диаметра трубопровода при заданном значении массового расхода (таблица 4).

Таблица 4.

Эффективность оптимизационных мероприятий

Table 4.

Effectiveness of optimizing actions

Массовый расход M , кг/ч Mass flow M , kg/h	Оптимальные параметры Optimal parameters		Неоптимальные параметры Non-optimal parameters		Показатель эффективности $K_{эф}$, % Efficiency indicator $K_{эф}$, %
	Диаметр D^* , м Diameter D^* , m	Суммарные затраты F^* , руб./год Total costs F^* , rubles/year	Диаметр D , м Diameter D , m	Суммарные затраты F , руб./год Total costs F , rubles/year	
100	0,063	$5,993 \cdot 10^4$	0,1	$6,690 \cdot 10^4$	11,63
150	0,073	$8,204 \cdot 10^4$	0,05	$9,515 \cdot 10^4$	15,98
200	0,083	$1,034 \cdot 10^5$	0,05	$1,344 \cdot 10^5$	29,98

Анализ формулы (27) и результатов вычислительного эксперимента позволяет сделать вывод о целесообразности и эффективности мероприятий, направленных на оптимизацию технологического трубопровода: поиск оптимального проектного решения при данных условиях тем целесообразнее, чем больше значение показателя эффективности $K_{эф}$ и наоборот.

Так, создание установки для транспортирования патоки в количестве 100 кг/ч с оптимальным диаметром трубопровода $D^* = 0,063$ м и ее эксплуатация в течение календарного года при односменном режиме работы обеспечит снижение суммарных годовых затрат на $0,697 \cdot 10^4$ руб./год. Эффективность оптимизационных мероприятий при этом составит $K_{эф} = 11,63\%$. Создание установки с оптимальным диаметром трубопровода $D^* = 0,083$ м для транспортирования 200 кг/ч патоки и ее эксплуатация при тех же временных режимах позволяет сэкономить $3,1 \cdot 10^4$ руб./год с эффективностью оптимизационных мероприятий при этом $K_{эф} = 29,98\%$.

Таким образом, экономически целесообразными и эффективными являются проектные решения по созданию высокопроизводительных гидравлических установок, эксплуатирующихся длительное время в течение календарного года. Создание малопроизводительных установок и их непродолжительная эксплуатация возможны без учета оптимальных параметров технологического трубопровода в виду низкой эффективности и экономической целесообразности.

Рассмотренная методика оптимизации технологических трубопроводов по технико-экономическим показателям, при необходимости, может быть дополнена проверочными расчетами трубопровода и его элементов на прочность, выносливость и вибрацию по соответствующим нормативным документам.

Заключение

1. Предложены расчетные соотношения для определения оптимального диаметра технологического трубопровода из условия минимизации суммарных годовых затрат на его создание и эксплуатацию с учетом текущих цен и тарифов на трубопровод и электроэнергию, трассировки трубопровода, условий его работы, а также свойств транспортируемой среды.

2. Проведены вычислительные эксперименты по оценке влияния диаметра трубопровода на технико-экономические показатели установки для транспортирования патоки с постоянным массовым расходом. Установлено, что увеличение диаметра трубопровода приводит к снижению эксплуатационных затрат на транспортирование патоки при одновременном увеличении капитальных затрат на создание трубопроводной системы. Найдено оптимальное значение диаметра трубопровода, обеспечивающее минимум суммарных годовых затрат на создание и эксплуатацию гидравлической установки для транспортирования патоки.

3. Проведены вычислительные эксперименты по оценке влияния массового расхода перекачиваемой патоки на технико-экономические показатели и оптимальные параметры трубопровода для перекачивания патоки. Установлено, что увеличение массового расхода перекачиваемой патоки приводит к повышению суммарных годовых затрат на создание и эксплуатацию трубопроводной системы. При этом значение

оптимального диаметра трубопровода возрастает, а потери давления в гидравлической установке незначительно снижаются.

4. Для приближенной оценки эффективности оптимизационных мероприятий предложен критерий, позволяющий сопоставить суммарные годовые затраты на создание и эксплуатацию технологических трубопроводов с оптимальными и отличными от них параметрами.

Литература

- 1 Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Проектирование и расчет оптимальных систем технологических трубопроводов. М.: Химия. 1991. 368 с.
- 2 Остриков А.Н. Процессы и аппараты пищевых производств. СПб.: Гиорд, 2012. 616 с.
- 3 Mikhalev M.A. Hydraulic calculation of pressure pipes // Magazine of Civil Engineering. 2012. V. 32. № 6. P. 20–28. doi: 10.5862/MCE.32.3
- 4 Арет В.А., Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции. СПб.: Гиорд, 2009. 448 с.
- 5 Косой В.Д., Виноградов Я.И., Малышев А.Д. Инженерная реология биотехнологических сред. СПб.: Гиорд, 2005. 648 с.
- 6 Кутепов А.М., Мешалкин В.П., Панов М.Я., Квасов И.С. Математическое моделирование потокораспределения в транспортных гидравлических системах с переменной структурой // Доклады РАН. 1996. Т. 350. № 5. С. 653–654.
- 7 Новицкий Н.Н., Михайловский Е.А. Объектно-ориентированное моделирование гидравлических цепей // Вестник ИРГТУ. 2012. № 7. С. 170–176.
- 8 Новицкий Н.Н., Сеннова Е.В., Сухарев М.Г. и др. Гидравлические цепи. Развитие теории и приложения. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 273 с.
- 9 Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г., Тевяшев А.Д. и др. Трубопроводные системы энергетики: методические и прикладные проблемы математического моделирования. Новосибирск: Наука, 2015. 475 с.
- 10 Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы. Москва, Берлин: Директ-Медиа, 2014. 694 с.
- 11 Мошев Е.Р., Белов В.Д. Системный анализ жизненного цикла трубопроводов нефтехимических предприятий как объекта компьютерного моделирования // Вестник ПНИПУ Химическая технология и биотехнология 2017. № 4. С. 152–168.
- 12 Колесников С.В., Кудинов И.В., Еремин А.В., Бранфилева А.Н. Использование компьютерных моделей для проектирования сложных трубопроводных систем // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2014. № 5. С. 72–83.
- 13 Василенко А.И., Федосенко А.А. Технико-экономическая оптимизация воздухопроводов // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2018/4674
- 14 Hlebnikov A., Siirde A., Paist A. Basics of optimal design of district heating pipelines diameters and design examples of Estonian old non-optimised district heating networks // Doctoral school of energy-and geotechnology. 2007. P. 15–20.
- 15 Гусев Ю.М., Гафаров Р.Р., Данилин О.Е. Оптимизация работы участка магистрального нефтепровода на основе генетического алгоритма // Вестник УГАТУ. Управление, ВТиИ. 2008. Т. 11 № 1 (28). С. 43–52.
- 16 Самарин О.Д. Технико-экономическая оптимизация диаметров теплопроводов систем водяного отопления // Новости теплоснабжения. 2011. № 5. С. 42–44.
- 17 Гагарин В.Г. Методы экономического анализа повышения уровня теплосащиты ограждающих конструкций зданий. Часть 1 // АВОК. 2009. № 1. С. 10–16.
- 18 Савастияенок А.Я. Оптимизация трубопроводных инженерных сетей гидравлического расчета // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2006. № 4. С. 67–72.
- 19 Шабанов В.А., Бондаренко О.В. Целевые функции и критерии оптимизации перекачки нефти по нефтепроводам при частотно-регулируемом электроприводе магистральных насосов // Нефтегазовое дело. 2012. № 4 С. 10–17.
- 20 Евлахов С.К. Методические предпосылки исследования задач оптимального управления потоками в сети магистральных нефтепроводов // Нефть, газ и бизнес. 2007. № 1–2. С. 28–30.
- 21 Гольянов А.И., Михайлов А.В., Нечваль А.М., Гольянов А.А. Выбор рационального режима работы магистрального трубопровода // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 1998. № 10. С. 16–18.

- 22 Зайцев А.В., Логвиненко А.В. Оптимизация Криогенного трубопровода // Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии». 2014. № 3 (133) С. 164–168.
- 23 Зайцев А.В., Логвиненко Е.В. Решение задачи оптимизации криогенного трубопровода с помощью метода поиска Парето-оптимального решения // Вестник МАХ. 2015. № 2. С. 55–60.
- 24 Шаганов А.Ю. Оптимизация материалозатрат на воздухопроводы вентиляционных систем методом динамического программирования в системе электронных таблиц // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. № 26. С. 128–136.
- 25 Селезнев В.Е., Алешин В.В., Клишин Г.С. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем. М: КомКнига, 2005. 327 с.
- 26 Chen H.J., Shiu H.R., Chen S.L. Process exhaust duct system design using dynamic programming methods // Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2003. V. 26. № 2. P. 155–164.
- 27 Murat J., Smyk A., Laskowski R.M. Selecting optimal pipeline diameters for a district heating network comprising branches and rings, using graph theory and cost minimization // Journal of Power Technologies. 2018. V. 98. № 1. P. 30–44.
- 28 Иванов А.В., Синюков В.В., Рязских В.И., Хвостов А.А. и др. Постановка задачи оптимизации трубопроводных сетей средств наземного обслуживания общего применения // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий: сб. тр. X междунар. конф. «ПМТУКТ-2017». Воронеж: Научная книга, 2017. С. 180–183.
- 29 Муратова Е.И., Смолихина П.М. Реология кондитерских масс: монография. Тамбов: ТГТУ, 2013. 187 с.

References

- 1 Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Design and calculation of optimal systems of technological pipelines. Moscow, Khimiya. 1991. 368 p. (in Russian).
- 2 Ostrikov A.N. Processes and apparatus of food production. St. Petersburg, Giord, 2012. 616 p. (in Russian).
- 3 Mikhalev M.A. Hydraulic calculation of pressure pipes. Magazine of Civil Engineering. 2012. vol. 32. no. 6. pp. 20–28. doi: 10.5862/MCE.32.3
- 4 Aret V., Nikolaev B.L., Nikolaev L.K. The Physical and mechanical properties of raw materials and finished products. St. Petersburg, Giord, 2009. 448 p. (in Russian).
- 5 Kosoy V.D., Vinogradov Ya.I., Malyshev A.D. Biotechnological environment engineering rheology. St. Petersburg, Giord, 2005. 648 p. (in Russian).
- 6 Kutepov A.M., Meshalkin V.P., Panov M.Ya., Kvasov I.S. Mathematical modeling of flow distribution in transport hydraulic systems with variable structure. Reports Russian Academy of Sciences. 1996. vol. 350. no. 5. pp. 653–654. (in Russian).
- 7 Novitsky N.N., Mikhailovsky E.A. Object-oriented modeling of hydraulic circuits. Bulletin OF IRGTU. 2012. no. 7. pp. 170–176. (in Russian).
- 8 Novitsky N.N., Sennova E.V., Sukharev M.G. et al. Hydraulic chains. Development of theory and application. Novosibirsk, Nauka, Siberian Publishing Company RAS, 2000. 273 p. (in Russian).
- 9 Novitsky N.N., Sukharev M.G., Tevyashev A.D. et al. Pipe-wiring power systems: Methodical and applied problems of mathematical modeling. Novosibirsk, Nauka, 2015. 475 p. (in Russian).
- 10 Seleznev V.E., Aleshin V.V., Dazyag S.N. Mathematical modeling of pipeline networks and channel systems: Methods, models and algorithms. Moscow, Berlin, Direkt-Media, 2014. 694 p. (in Russian).
- 11 Moshev E.R., Belov V.D. System analysis of the life cycle of pipelines of petrochemical enterprises as a object of computer modeling. Bulletin of the PNIPU Chemical Technology and Biotechnology. 2017. no. 4. pp. 152–168. (in Russian).
- 12 Kolesnikov S.V., Kudinov I.V., Eremin A.V., Branfileva A.N. Use of computer models for designing complex pipeline systems. Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. 2014. no. 5. pp. 72–83. (in Russian).
- 13 Vasilenko A.I., Fedosenko A.A. Technical and economic optimization of air ducts. The Don Engineering Herald. 2018. no. 1. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/nly2018/4674 (in Russian).
- 14 Hlebnikov A., Siirde A., Paist A. Basics of optimal design of district heating pipelines diameters and design examples of Estonian old non-optimised district heating networks. Doctoral school of energy-and geotechnology. 2007. pp. 15–20.
- 15 Gusev Yu.M., Gafarov R.R., Danilin O.E. Optimization of the main oil pipeline site on the basis of genetic algorithm. Bulletin of the UGATU. Management, VTI. 2008. vol. 11. no. 1(28). pp. 43–52. (in Russian).
- 16 Samarin O.D. Technical and economic optimization of diameters of heat conductors of water heating systems. News of heat supply. 2011. no. 5. pp. 42–44. (in Russian).
- 17 Gagarin V.G. Methods of economic analysis of the increase in the level of heat protection of building enclosures. Part 1. AVOK. 2009. no. 1. pp. 10–16. (in Russian).
- 18 Savastienok A.Ya. Optimization of pipeline engineering networks of hydraulic calculation. Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS. 2006. no. 4. pp. 67–72. (in Russian).

- 19 Shabanov V.A., Bondarenko O.V. Target functions and criteria for optimization of oil transfer through oil pipelines with the private-regulated electric drive of the MMA pumps. Oil and Gas business. 2012. no. 4. pp. 10–17. (in Russian).
- 20 Yevlakhov S.K. Methodological prerequisites for the study of the tasks of optimal flow management in the network of main oil pipelines. Oil, gas and business. 2007. no. 1–2. pp. 28–30. (in Russian).
- 21 Golyanov A.I., Mikhailov A.V., Necchval A.M., Golyanov A.A. Selection of rational mode of operation of main pipeline. Transportation and renovation of oil products. 1998. no. 10. pp. 16–18. (in Russian).
- 22 Zaitsev A.V., Logvinenko A.V. Optimization Of Cryogenic pipeline. Omsk scientific bulletin. Instrumentation, machine and technology series. 2014. no. 3 (133). pp. 164–168. (in Russian).
- 23 Zaitsev A.V., Logvinenko E.V. Solution of the problem of optimization of the cryogenic pipeline using the search method of the Pareto-optimal solution. MAX Vestnik. 2015. no. 2. pp. 55–60. (in Russian).
- 24 Shaganov A.Yu Optimization of material costs for ventilation ducts by dynamic programming in the spreadsheet system. Bulletin of the State Technical University of the Azov. Series: Technical sciences. 2013. no. 26. pp. 128–136. (in Russian).
- 25 Seleznev V.E., Aleshin V.V., Klishin G.S. Methods and technologies for numerical simulation of gas pipeline systems. Moscow, KomKniga, 2005. 327 p. (in Russian).
- 26 Chen H.J., Shiu H.R., Chen S.L. Process exhaust duct system design using dynamic programming methods. Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2003. vol. 26. no. 2. pp. 155–164.
- 27 Murat J., Smyk A., Laskowski R.M. Selecting optimal pipeline diameters for a district heating network comprising branches and rings, using graph theory and cost minimization. Journal of Power Technologies. 2018. vol. 98. no. 1. pp. 30–44.
- 28 Ivanov A.V., Sinyukov V.V., Ryazhskikh V.I., Khvostov A.A. et al. Statement of the problem of optimization of pipeline networks of ground-based facilities for general use. Modern methods of applied mathematics, control theory and computer technology: collection of articles. tr X int. conf. "PMTUKT 2017". Voronezh, Nauchnaya kniga, 2017. pp. 180–183. (in Russian).
- 29 Muratova E.I., Suchitollihina P.M. Rheology of confectionery masses: monograph. Tambov, TGTU, 2013. 187 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Анатолий А. Хвостов д.т.н., профессор, кафедра 206 математики, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул Старых Большевиков, 54 А, г. Воронеж, 394064, Россия, khvtol1974@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3836-9404>

Магомед Г. Магомедов д.т.н., доцент, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия), mmg@inbox.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2494-4973>

Алексей А. Журавлев к.т.н., доцент, кафедра 206 математики, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул Старых Большевиков, 54 А, г. Воронеж, 394064, Россия, zhuraa1@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2194-767X>

Елена А. Шипилова к.т.н., доцент, кафедра 206 математики, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул Старых Большевиков, 54 А, г. Воронеж, 394064, Россия, elen_ship@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1050-036X>

Олег А. Семенihin к.т.н., доцент, кафедра прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет, Московский пр-т, 14, г. Воронеж, 394026, Россия, semenihin72@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2611-0297>

Information about authors

Anatoly A. Khvostov Dr. Sci. (Engin.), professor, 206 department of mathematics, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh), Saryh Bolshevikov street, 54 A Voronezh, 394064, Russia, khvtol1974@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3836-9404>

Magomed G. Magomedov Dr. Sci. (Engin.), associate professor, bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologie, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mmg@inbox.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2494-4973>

Alexei A. Zhuravlev Cand. Sci. (Engin.), associate professor, 206 department of mathematics, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh), Saryh Bolshevikov street, 54 A Voronezh, 394064, Russia, zhuraa1@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2194-767X>

Elena A. Shipilova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, 206 department of mathematics, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh), Saryh Bolshevikov street, 54 A Voronezh, 394064, Russia, elen_ship@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1050-036X>

Oleg A. Semenihin Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of applied mathematics and mechanics, Voronezh State Technical University, , Moscow Av., 14 Voronezh, 394026, Russia, semenihin72@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2611-0297>

Анатолий А. Никитченко к.т.н., доцент, кафедра изыскания и проектирования аэродромов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул Старых Большевиков, 54 А, г. Воронеж, 394064, Россия, nik.to77@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-0039-1449>

Anatoly A. Nikitchenko Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of pioneering and design of airfields, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh), Staryh Bolshevikov street, 54 A Voronezh, 394064, Russia, nik.to77@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-0039-1449>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 03/02/2020	После редакции 12/02/2020	Принята в печать 21/02/2020
Received 03/02/2020	Accepted in revised 12/02/2020	Accepted 21/02/2020