
ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 628.14

Анализ процессов теплообмена на поверхности надземного трубопровода с теплоизоляцией

В. Ф. Лапшин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Лапшин В. Ф.* Анализ процессов теплообмена на поверхности надземного трубопровода с теплоизоляцией // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 147–156. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-147-156

Аннотация

Цель: Объекты транспортной инфраструктуры включают в себя разнообразные системы водоснабжения. В условиях отрицательных температур окружающей среды возникает опасность замерзания и разрушения водоводов. При математическом моделировании работы надземных трубопроводов большое значение имеет правильное описание процесса теплообмена между наружной стенкой трубопровода и окружающей атмосферой. Граничное условие, соответствующее этому процессу, традиционно включает в себя коэффициент теплопередачи, зависящий от ряда непредсказуемых параметров (скорости и направления ветра, давления атмосферы, влажности воздуха). Цель настоящей работы состоит в проведении сравнительного анализа роли свободного и вынужденного конвективного теплообмена и обосновании возможности постановки граничного условия, зависящего только от температуры наружного воздуха. **Методы:** Для решения поставленной задачи в работе используется численный анализ критериев подобия для процесса теплообмена в условиях, характерных для работы надземного трубопровода с теплоизоляцией. Обоснование граничного условия на внешней поверхности трубопровода основывается на законе сохранения энергии. **Результаты:** Определены области значений параметров задачи, при которых преобладает свободный или вынужденный конвективный теплообмен. Показано, что в условиях, характерных для работы надземных водоводов, преобладает вынужденная конвекция. При этом разница между температурами внешней поверхности трубопровода с теплоизоляцией и окружающей атмосферы мала. Показано, что в этом случае в качестве граничного условия целесообразно использовать равенство температур атмосферного воздуха и поверхности трубопровода. **Практическая значимость:** Понимание механизмов теплообмена позволяет создать адекватную модель работы трубопровода в условиях отрицательных температур. Постановка более точного и простого граничного условия на поверхности водовода упрощает задачу математического моделирования. Результаты, полученные в настоящей статье, могут быть использованы при математическом моделировании трубопроводов с теплоизоляцией.

Ключевые слова: Надземный трубопровод, теплоизоляция, конвективный теплообмен, коэффициент теплопередачи, граничное условие, математическая модель.

Введение

Системы водоснабжения являются важными составляющими объектов транспортной инфраструктуры. При эксплуатации водоводов надземной прокладки в условиях отрицательных температур возникает опасность их замерзания и последующего разрушения. Изучение этой важной проблемы имеет большую историю и актуально до настоящего времени [1–8]. Как известно, в случае остановки движения воды происходит ее остывание и образование льда, постепенно перекрывающего поперечное сечение трубопровода. Для правильной оценки времени промерзания необходимо решать нестационарное дифференциальное уравнение теплопроводности с учетом фазового перехода вода — лед внутри трубопровода. Важное значение для математической модели остывания и промерзания водовода имеет описание процесса теплообмена между наружной стенкой трубопровода и окружающей атмосферой. Учет этого взаимодействия осуществляется при постановке граничного условия на внешней поверхности водовода. Как известно [9], основным механизмом передачи тепла от твердой стенки к наружному воздуху является конвективный теплообмен. На этом основании, при формулировании математической модели традиционно используется граничное условие третьего рода, опирающееся на закон теплообмена Ньютона. В настоящей работе анализируется роль вынужденного и естественного конвективного теплообмена в процессе остывания водовода. Рассматривается влияние конвективного теплообмена на разность значений температур наружной стенки трубопровода, защищенного слоем теплоизоляции, и окружающей атмосферы.

1. Свободная и вынужденная конвекции при охлаждении трубопровода

В работе рассматривается процесс теплообмена аксиально-симметричного трубопровода надземной прокладки с окружающей атмосферой. Величина потока тепла q на границе внешней поверхности водовода и окружающей атмосферы определяется только теплопроводностью воздуха [10] и поэтому может быть вычислена с помощью закона Фурье:

$$q = -\lambda_a \left. \frac{\partial T_a}{\partial r} \right|_{r=R}, \quad (1)$$

где λ_a — коэффициент теплопроводности воздуха;

$T_a(r)$ — температура воздуха;

r — радиальная переменная;

R — внешний радиус трубопровода.

Отметим, что для непосредственного использования (1) понадобилось бы решить систему гидродинамических уравнений, описывающих конвекцию вблизи трубопровода. Такие решения получены только для небольшого числа частных случаев [11]. Чтобы упростить задачу, для расчета потока тепла, уходящего в атмосферу, используют закон теплообмена Ньютона:

$$q = \alpha (T_w - T_{ex}), \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи;

T_w и T_{ex} — температуры внешней поверхности водовода и окружающей атмосферы соответственно.

Значение величины α , как правило, определяют экспериментально. Для того чтобы результаты отдельных измерений можно было распространить на подобные между собой процессы, их выражают через безразмерный коэффициент теплопередачи — число Нуссельта Nu :

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_a}. \quad (3)$$

Здесь $D = 2R$ — наружный диаметр водовода.

Число Nu определяют отдельно для вынужденной и свободной конвекции. Система гидродинамических уравнений вынужденной конвекции при поперечном обтекании трубопровода, кроме независимых переменных, содержит всего пять параметров [11]: кинематическую вязкость ν и температуропроводность a атмосферного воздуха, скорость набегающего потока воздуха V , наружный диаметр D и характерную разность температур $\Delta T = T_w - T_{ex}$. Из этих параметров можно составить всего две независимые безразмерные комбинации: число Рейнольдса $Re = VD/\nu$ и число Прандтля $Pr = \nu/a$. Это значит, что число Нуссельта для вынужденной конвекции Nu_f может быть функцией только двух параметров: $Nu_f = f(Re, Pr)$. Отметим, что для воздуха число $Pr \approx 0,72$ [9] и слабо зависит от температуры. Для выяснения конкретного вида функции подобия $f(Re, Pr)$ обычно проводят серию экспериментов, в которых определяют число Nu_f при различных значениях Re и Pr . Затем аппроксимируют полученную зависимость, как правило, степенными функциями. Измерению коэффициентов теплоотдачи посвящено большое число экспериментальных работ (см., например, [6, 9, 10]). Отметим, что различие используемых методик и ошибки измерений приводят к существенному разбросу значений чисел Нуссельта для одинаковых параметров Re и Pr . Так, например, в работах [6, 9, 10] для диапазона значений чисел Рейнольдса $4 \cdot 10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$, характерного для обтекания воздухом надземного водовода, и $Pr = 0,72$ приведены следующие виды функций подобия при поперечном обтекании цилиндра:

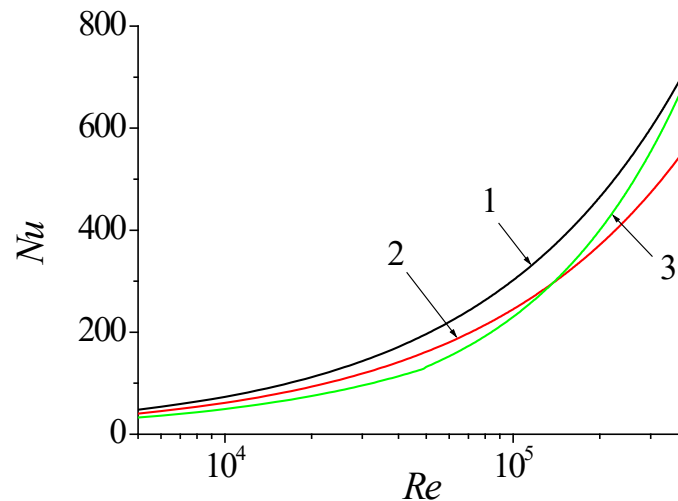


Рис. 1. Графики функции подобия $Nu_f = f(Re)$ для вынужденной конвекции:
1 — [6], 2 — [9], 3 — [10]

$Nu_f = 0,245Re^{0,6}$ [9], $Nu_f = 0,023Re^{0,8}$ [10], $Nu_f = 0,877(0,31Re^{0,5} + 0,11Re^{0,67})$ [6]. Графики этих функций приведены на рис. 1. Хорошо видно, что разница в значениях чисел Нуссельта у разных авторов составляет 20–30 %.

Система гидродинамических уравнений для свободной конвекции также содержит пять параметров [11]: ν , a , D , ΔT и $g\beta$. Здесь $g = 9,81$ м/с², β — температурный коэффициент расширения воздуха (для идеального газа $\beta = 1/T_a$). Из этих параметров можно составить только две независимые безразмерные комбинации: число Рэлея $Ra = g\beta D^3 \Delta T / \nu a$ и число Прандтля $Pr = \nu / a$. Приведем здесь два выражения для функции подобия Nu_c , соответствующие свободной конвекции при $Pr = 0,72$ и $Ra < 10^{12}$: $Nu_c = (0,6 + 0,3216Ra^{1/6})^2$ [6], $Nu_c = 0,25(Ra^{0,25} + 0,27Ra^{0,333})$ [9]. Отметим, что в диапазоне значений $10^7 < Ra < 10^9$, характерном для свободной конвекции вокруг водовода надземной прокладки, различие между приведенными функциями невелико и составляет менее 5 %.

Для выявления роли вынужденной и свободной конвекции в теплообмене водовода с атмосферой найдем значения $Re^* = f(Ra)$, определяемые равенством критериев Нуссельта:

$$Nu_f(Re) = Nu_c(Ra). \quad (4)$$

На рис. 2 представлен график функции $Re^*(Ra)$ и указаны область I ($Re > Re^*$), где $Nu_f > Nu_c$ и в теплообмене преобладает вынужденная конвекция, и область II ($Re < Re^*$), где $Nu_f < Nu_c$ и в теплообмене преобладает естественная конвекция.

Как видно из рис. 2, в области характерных для теплообмена водовода с окружающей атмосферой значений $Ra < 10^9$ и $Re > 4 \cdot 10^4$ преобладает вынужденный конвективный теплообмен.

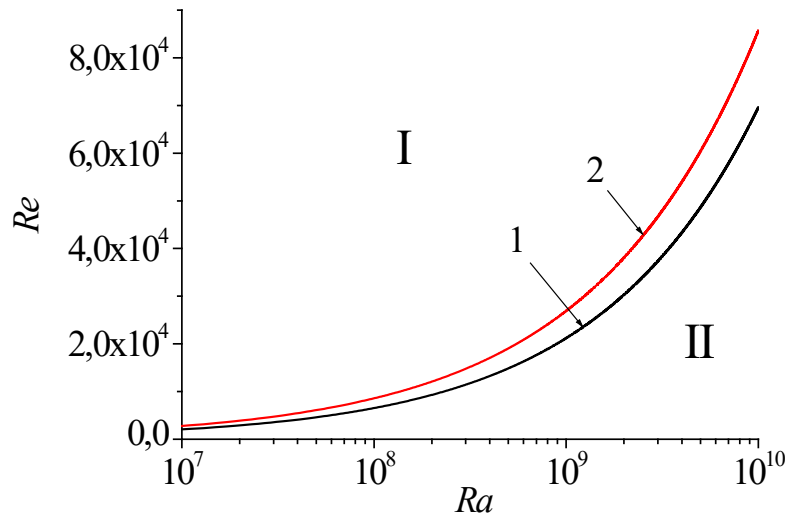


Рис. 2. График функции $Re^*(Ra)$, удовлетворяющей равенству критериев Нуссельта (4): I — область преобладания вынужденной конвекции, II — область преобладания свободной конвекции в теплообмене. Значения Re^* рассчитаны с использованием функций подобия: 1 — из [6], 2 — из [9]

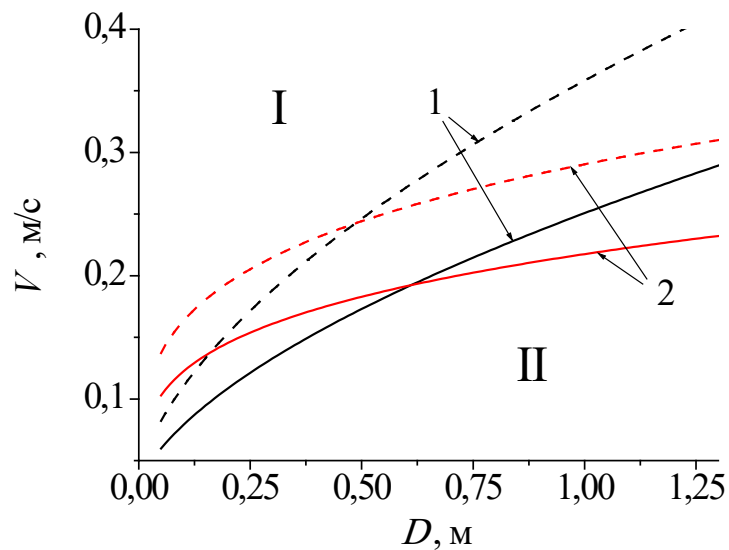


Рис. 3. График функции $V^*(D, \Delta T)$, удовлетворяющей равенству критериев Нуссельта (4): I — область вынужденной конвекции, II — область свободной конвекции. Значения V^* рассчитаны с использованием функций подобия: 1 — из [6], 2 — из [9]. Сплошная линия — $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, пунктир — $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

Используя определения чисел Ra и Re , решение уравнения (4) можно представить в виде зависимостей скоростей воздуха $V^* = f(D, \Delta T)$. Результаты вычислений V^* представлены на рис. 3. График функции $V^* = f(D, \Delta T)$ делит плоскость значений $V-D$ на две области: при $V > V^*$ в теплообмене преобладает вынужденная конвекция (область I), а при $V < V^*$ (область II) — естественная конвекция.

Хорошо видно, что, при поперечном обтекании, уже при скорости воздуха $V > 0,4$ м/с, основным механизмом теплообмена водовода с окружающей атмосферой является вынужденная конвекция.

2. Анализ граничного условия на поверхности водовода с теплоизоляцией

При математическом моделировании процессов остывания и замерзания водовода неизбежно приходится формулировать граничное условие на его внешней поверхности. Традиционно для этой цели используется закон теплообмена Ньютона (2):

$$-\lambda_i \left. \frac{\partial T_i}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha (T_w - T_{ex}). \quad (5)$$

Здесь λ_i и $T_i(r)$ — теплопроводность и температура материала теплоизолятора, $T_i(R) = T_w$. Существенным недостатком соотношения (4) является значительная неопределенность в значении величины коэффициента теплоотдачи α . Это связано с тем, что, во-первых, имеет место разброс (до 30 %) в значениях критерия Нуссельта, рассчитанного для подобных процессов у разных авторов. Во-вторых, в случае реального остывания водовода имеется значительная неопределенность относительно таких параметров, как направление и величина скорости ветра и влажность воздуха, существенным образом влияющих на значение α . Отметим здесь также, что величина α может в разы изменяться вдоль периметра поперечного сечения трубопровода. Фактически в (5) входит некоторое среднее по поверхности трубопровода значение α .

Оценим здесь относительную разность температур окружающей атмосферы и поверхности водовода $\varepsilon = \Delta T / (T_0 - T_{ex})$. Из (3) и (5) следует, что:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T}{T_0 - T_{ex}} = \frac{D \lambda_i}{\delta \lambda_a} \frac{1}{Nu_f}, \quad (6)$$

где T_0 — температура воды на оси трубопровода; $\Delta T = T_w - T_{ex}$; δ — толщина слоя теплоизоляции. Результаты расчетов величины ε для $\lambda_i = 0,04$ Вт/(м·К) [12], $\nu = 1,16$ м²/с, $\lambda_a = 0,023$ Вт/(м·К) [9] приведены на рис. 4.

Хорошо видно, что для $D < 1$ м уже при скорости ветра $V > 0,5$ м/с отклонение температуры внешней поверхности водовода от температуры атмосферного воздуха не превышает 8 %. Это означает, что температура внешней поверхности водовода в реальных условиях близка к температуре наружного воздуха.

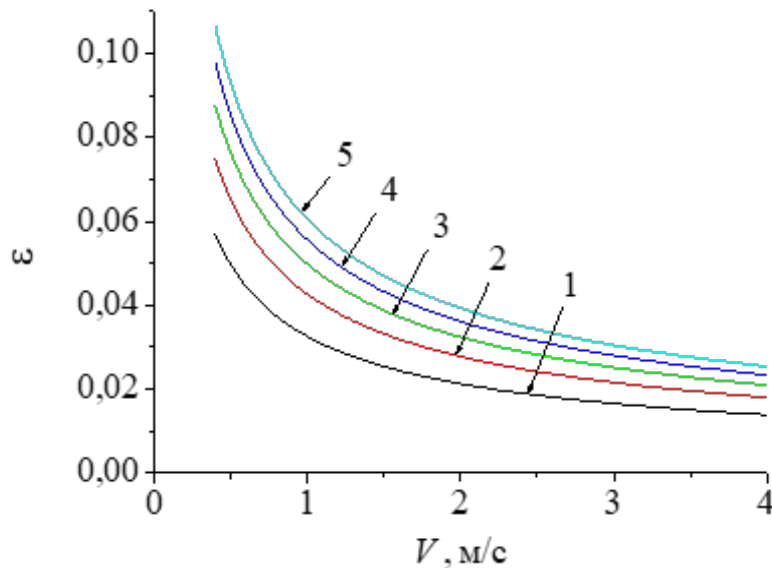


Рис. 4. Зависимость относительной разности температур ε от скорости поперечного ветра V при толщине слоя теплоизолятора $\delta = 0,1$ м для различных значений диаметра трубопровода D :

1 — 0,2 м; 2 — 0,4 м; 3 — 0,6 м; 4 — 0,8 м; 5 — 1,0 м

Соответственно, вместо граничного условия (5) целесообразно использовать более точное и простое условие равенства температур внешней поверхности трубопровода T_w и атмосферного воздуха T_{ex} :

$$T_w = T_{ex}.$$

Заключение

В настоящей работе выполнен анализ механизмов конвективного теплообмена водовода надземной прокладки с окружающей атмосферой. Показано, что основную роль в теплообмене играет вынужденная конвекция. При этом даже при незначительных скоростях ветра $V \sim 1$ м/с отклонение температуры внешней поверхности водовода со слоем теплоизоляции от температуры атмосферного воздуха невелико и составляет всего несколько процентов от разности температур между водой в трубопроводе и атмосферой. Это позволяет при математическом моделировании замерзания водоводов с теплоизоляцией использовать простое граничное условие равенства температур окружающей атмосферы и поверхности трубопровода. Результаты, полученные в настоящей статье, могут быть использованы при математическом моделировании работы трубопроводов в условиях отрицательных температур.

Библиографический список

1. Богословский П. А. Ледовый режим трубопроводов гидроэлектрических станций / П. А. Богословский. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950. — 154 с.
2. Жидких В. М. Ледовый режим трубопроводов / В. М. Жидких, Ю. А. Попов. — Л.: Энергия, 1979. — 132 с.
3. Cheng K. C. Freezing and melting heat transfer in engineering: Selected topics on ice–water systems and welding and casting processes / K. C. Cheng, N. Seki. — New York: Hemisphere, 1991. — 815 p.
4. Gordon J. R. An Investigation into Freezing and Bursting Water Pipes in Residential Construction / J. R. Gordon // Research Report, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA. — 1996. — Iss. 96-1. — Pp. 1-51. — URL: <https://www.ideals.illinois.edu/items/54859>.
5. Akyurt M. Freezing phenomena in ice–water systems / M. Akyurt, G. Zaki, B. Habeebullah // Energy Conversion and Management. — 2002. — Vol. 43. — Pp. 1773–1789.
6. McDonald A. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes / A. McDonald, B. Bscheiden, E. Sullivan et al. // Applied Thermal Engineering. — 2014. — Vol. 73(1). — Pp. 142–153.
7. Hongfei Xu. Modelling ice and wax formation in a pipeline in the Arctic environment / Xu Hongfei, H. Dali, S. Yue et al. // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2020. — Vol. 66. — P. 104197. — DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104197.
8. Терехов Л. Д. Внутреннее обледенение водоводов в зимний период / Л. Д. Терехов, Н. В. Твардовская, Е. А. Твардовская // III Бетанкуровский международный инженерный форум: сборник трудов, Санкт-Петербург, 2–3 декабря 2021 года. — СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. — Т. 2. — С. 161–164.
9. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.
10. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.
11. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М.: Наука, 1986. — 736 с.
12. ГОСТ 21880—2011. Маты из минеральной ваты прошивные теплоизоляционные / Редактор В. Н. Копысов. — М.: Стандартинформ, 2012. — 10 с.

Дата поступления: 30.06.2023

Решение о публикации: 31.07.2023

Контактная информация:

ЛАПШИН Владимир Федорович — д-р физ.-мат. наук, проф; lapshinvf@mail.ru

Analysis of Heat Exchange Processes on the Surface of the Aboveground Pipeline with Heat Insulation

V. F. Lapshin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Lapshin V. F. Analysis of Heat Exchange Processes on the Surface of the Aboveground Pipeline with Heat Insulation. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 147–156. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-147-156

Summary

Purpose: Transport infrastructure facilities include a variety of water supply systems. In the conditions of negative ambient temperatures, there is a risk of freezing and destruction of water pipelines. In mathematical modeling of the operation of aboveground pipelines, the correct description of the heat exchange process between the outer wall of the pipeline and the surrounding atmosphere is of great importance. The boundary condition corresponding to this process traditionally includes a heat transfer coefficient depending on a number of unpredictable parameters (wind speed and direction, atmospheric pressure, air humidity). The purpose of this work is to carry out a comparative analysis of the role of free and forced convective heat exchange and to justify the possibility of setting a boundary condition that depends only on the outside air temperature. **Methods:** To solve this problem, the work uses numerical analysis of similarity criteria for the heat exchange process under conditions typical for the operation of an above-ground pipeline with thermal insulation. The justification of the boundary condition on the external surface of the pipeline is based on the law of energy conservation. **Results:** The values of the parameters of the problem are determined, in which free or forced convective heat exchange prevails. It has been shown that forced convection prevails in conditions typical for the operation of above-ground water pipelines. Under these conditions, the difference between the temperature of the external surface of the insulated pipeline and the surrounding atmosphere is small. It has been shown that in this case, it is advisable to use the equality of atmospheric air temperatures and pipeline surface temperatures as a boundary condition. **Practical significance:** Understanding the mechanisms of heat exchange makes it possible to create an adequate model of the operation of pipelines in conditions of negative temperatures. Setting a more accurate and simple boundary condition on the surface of the pipeline simplifies the task of mathematical modeling. The results obtained in this article can be used in mathematical modeling of any pipelines with thermal insulation.

Keywords: Above-ground pipeline, heat insulation, convective heat exchange, heat transfer coefficient, boundary condition, mathematical model.

References

1. Bogoslovskiy P. A. *Ledovyy rezhim truboprovodov gidroelektricheskikh stantsiy* [Ice regime of pipelines of hydroelectric stations]. M.; L.: Gosenergoizdat Publ., 1950, 154 p. (In Russian)
2. Zhidkikh V. M., Popov Yu. A. *Ledovyy rezhim truboprovodov* [Ice regime of pipelines]. L.: Energiya Publ., 1979, 132 p. (In Russian)
3. Cheng K. C., Seki N. *Freezing and melting heat transfer in engineering: Selected topics on ice–water systems and welding and casting processes*. New York: Hemisphere, 1991, 815 p.
4. Gordon J. R. *An Investigation into Freezing and Bursting Water Pipes in Residential Construction*. Research Report, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, USA, 1996, Iss. 96-1, pp. 1–51. Available at: <https://www.ideals.illinois.edu/items/54859>.

5. Akyurt M., Zaki G., Habeebullah B. Freezing phenomena in ice–water systems. *Energy Conversion and Management*, 2002, vol. 43, pp. 1773–1789.
6. McDonald A., Bscheiden B., Sullivan E. et al. Mathematical simulation of the freezing time of water in small diameter pipes. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 73(1), pp. 142–153.
7. Hongfei Xu., Dali H., Yue S. et al. Modelling ice and wax formation in a pipeline in the Arctic environment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, vol. 66, p. 104197. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104197.
8. Terekhov L. D., Tvardovskaya N. V., Tvardovskaya E. A. *Vnutrennee obledenenie vodovodov v zimniy period III Betankurovskiy mezhdunarodnyy inzhenernyy forum: sbornik trudov, Sankt-Peterburg, 2–3 dekabrya 2021 goda* [Internal icing of water pipelines in winter. III Betancourt International Engineering Forum: collection of proceedings, St. Petersburg, December 2–3 2021]. St. Petersburg: FGBOU VO PGUPS Publ., 2021, vol. 2, pp. 161–164.
9. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Energiya Publ., 1977, 344 p. (In Russian)
10. Kutateladze S. S., Lifshits E. M. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow: Atomizdat Publ., 1979, 416 p. (In Russian)
11. Landau L. D. *Teoreticheskaya fizika. T. VI. Gidrodinamika* [Theoretical physics. T. VI. Hydrodynamics]. Moscow: Nauka Publ., 1986, 736 p. (In Russian)
12. *GOST 21880—2011. Maty iz mineral'noy vaty proshivnye teploizolyatsionnye. Redaktor V. N. Kopysov* [GOST 21880—2011. Heat-insulating pierced mineral wool mats. Editor V. N. Kopysov]. Moscow: Standartinform Publ., 2012, 10 p. (In Russian)

Received: June 30, 2023

Accepted: July 31, 2023

Author's information:

Vladimir F. LAPSHIN — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor; lapshinvf@mail.ru