

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-508-514>

УДК 621.6.07

## Гидравлический расчет медных трубопроводов систем отопления и внутреннего газоснабжения

Канд. техн. наук М. А. Рутковский<sup>1)</sup>, А. С. Шибeko<sup>1)</sup>, К. И. Галыня<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** При конструировании современных систем отопления, водо- и газоснабжения жилых зданий широко применяются медные трубопроводы, имеющие ряд преимуществ перед стальными и пластиковыми. Главной причиной ограниченности использования медных труб является их стоимость (практически в два раза большая, чем стальных, и в четыре раза, чем полипропиленовых). Современные нормы проектирования в Беларуси не содержат конкретных методов расчета медных трубопроводов. Поэтому был рассмотрен и проанализирован гидравлический расчет систем отопления на основании норм Российской Федерации. Недостатком приведенных в российских нормах теоретических выкладок является их отвлеченность от общих законов механики жидкости и газа. Ввиду этого рассмотрены теоретические основы гидравлического расчета трубопроводов, приведены выражения для определения потерь давления на трение и в местных сопротивлениях. Для определения линейных потерь рассмотрены основные режимы течения сред на основании опытов И. Никурадзе и представлены зависимости для определения коэффициента сопротивления трению в ламинарном, переходном и турбулентном режимах. Для расчета потерь давления приведены значения коэффициентов местного сопротивления для основных элементов трубопроводов, а также показано определение величины  $\zeta$  с учетом пропускной способности оборудования. Проведен анализ номограмм, представленных в российских нормах и исследованиях, выявлены недостатки и найдены пути их совершенствования. С учетом приведенных в статье зависимостей построены номограммы для расчета удельных потерь давления в системах отопления и внутреннего газоснабжения на основе природного газа и пропана. Для расчета внутридомового газоснабжения построены номограммы для нахождения эквивалентной длины единичного местного сопротивления.

**Ключевые слова:** газоснабжение, коэффициент трения, коэффициент местного сопротивления, номограмма, отопление, потери давления, режимы течения, трубопровод, число Рейнольдса

**Для цитирования:** Рутковский, М. А. Гидравлический расчет медных трубопроводов систем отопления и внутреннего газоснабжения / М. А. Рутковский, А. С. Шибeko, К. И. Галыня // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 6. С. 508–514. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-508-514>

## Hydraulic Calculation of Copper Pipelines for Heating and Internal Gas Supply Systems

М. А. Rutkowski<sup>1)</sup>, А. S. Shybeko<sup>1)</sup>, К. I. Halynia<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Copper pipelines are widely used while designing modern heating systems, water and gas supply of residential buildings and these pipelines have a number of advantages in comparison with steel and plastic pipelines. The main reason for limited use of copper pipes is their cost which is practically twice as much as cost of steel pipes, and four times higher than

### Адрес для переписки

Шибeko Александр Сергеевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220114, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 265-97-29  
fgv\_fes@bntu.by

### Address for correspondence

Shybeko Alexander S.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosty Ave.,  
220114, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 265-97-29  
fgv\_fes@bntu.by

the coat of polypropylene pipes. Modern design standards in Belarus do not contain specific requirements for calculation of copper pipelines. Therefore hydraulic calculation of heating systems has been considered and analyzed on the basis of norms of Russian Federation. The drawback of all theoretical calculations presented in Russian standards is their abstraction from general laws of fluid and gas mechanics. For this reason theoretical foundations of hydraulic calculations for all pipelines have been considered and expressions have been given for determination of pressure loss due to friction and in local loss. Main flow regimes have been considered on the basis of I. Nikuradze's experiments in order to determine linear losses and dependences for determination of friction coefficient in laminar, transient and turbulent modes have been presented in the paper. Values of local loss coefficient for main pipeline elements are given for calculation of pressure loss and the paper also shows determination of value  $\zeta$  with due account of equipment capacity. An analysis of nomograms presented in Russian norms and researches has been carried out; shortcomings have been revealed and the ways directed on their perfection have been found. Nomograms for calculation of specific pressure losses in heating systems and internal gas supply have been constructed on the basis of natural gas and propane with due account of dependences presented in the paper. Nomograms for finding equivalent length of a single local loss have been constructed for calculation of internal gas supply systems.

**Keywords:** gas supply, friction coefficient, local loss coefficient, nomogram, heating, pressure loss, flow regime, pipeline, Reynolds number

**For citation:** Rutkowski M. A., Shybeka A. S., Halynia K. I. (2018) Hydraulic Calculation of Copper Pipelines for Heating and Internal Gas Supply Systems. *Science and Technique*. 17 (6), 508–514. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-6-508-514> (in Russian)

В последнее время медные трубопроводы широко применяются при проектировании систем отопления, внутреннего водо- и газоснабжения индивидуальных жилых домов и коттеджей, а также в системах холодоснабжения в качестве холодопроводов. Возможность использования данных труб объясняется рядом положительных качеств, которые им присущи вследствие особенностей физико-химических свойств сплавов на основе меди. Среди достоинств можно выделить:

- 1) пластичность, которая позволяет выдерживать давление, возникающее при замерзании воды в системе отопления;
- 2) коррозионностойкость;
- 3) герметичность;
- 4) малую шероховатость стенок (1,5–10,0 мкм [1, 2]);
- 5) бактерицидность [3];
- 6) длительный срок службы (стальные трубы – 20–25 лет, медные – более 50 лет);
- 7) небольшой коэффициент линейного расширения (медь –  $17 \cdot 10^{-6}$  1/К, сталь –  $12 \cdot 10^{-6}$  1/К, полипропилен –  $150 \cdot 10^{-6}$  1/К);
- 8) скорость и легкость монтажа при помощи фитингов, в то же время при использовании пайки длительность и трудность монтажа являются недостатками.

Основной недостаток медных труб – стоимость: 1 м стальной водогазопроводной трубы DN 20 стоит 2,5 белор. руб., медной 22,0×1,0 – 4,62 белор. руб., полипропиленовой 25,0×3,5 –

1–2 белор. руб. Еще одним недостатком является усиление коррозии стальных и алюминиевых деталей при их контакте с медью в водной среде, что устраняется при использовании переходников из бронзы или нержавеющей стали. Высокая теплопроводность меди (практически в семь раз больше, чем стали, и в 1700 раз больше, чем полипропилена) в различных случаях может быть как достоинством, так и недостатком.

На данный момент особые требования по проектированию и расчету систем отопления и внутреннего газоснабжения из медных трубопроводов в нормативных документах Республики Беларусь отсутствуют. В Российской Федерации с 2005 г. действует СП 40-108–2004 [4], некоторые данные из него будем использовать в статье. Применительно к системам газоснабжения конкретные требования по расчету отсутствуют как в белорусских, так и в российских ТНПА. Теория расчета медных газопроводов приведена в [5], где представлены полученные авторами номограммы для расчета. Однако изложенный в статье материал не в достаточной мере содержит информацию, необходимую для организации расчетов. При ознакомлении с методами расчета систем отопления, внутреннего водо- и газоснабжения, изложенными в нормативной литературе, может возникнуть ложное впечатление об отличиях в расчетах, так как в документах используется собственная терминология, отличная от классической механи-

ки жидкости и газа, и формулы, являющиеся частными случаями общих выражений. Ввиду вышеперечисленного гидравлический расчет трубопроводов следует рассмотреть более подробно.

Цель гидравлического расчета трубопроводов – подбор диаметров на участках сети с последующим определением потерь давления в системе. Диаметры участков системы отопления определяются по допустимой скорости движения теплоносителя – до 2 м/с, оптимальной для длительного использования является скорость 0,25–0,50 м/с [4]. В системах газоснабжения диаметры участков задаются, причем на ответвлениях к газовому оборудованию диаметр должен быть не менее диаметра присоединительного штуцера прибора. Проверка соответствия подобранных диаметров производится сравнением потерь давления в системе с расчетными потерями давления, которые составляют не более 600 Па [6, 7]. С учетом степени шума, создаваемого движущимся газом, скорость рекомендуется принимать не более 7 м/с [6, 7].

В общем случае снижение давления транспортируемой среды на участке сети  $\Delta p_{\text{уч}}$ , Па, находится как сумма потерь на трение о стенки трубопровода  $\Delta p_{\text{тр}}$  и в местных сопротивлениях  $\Delta p_{\text{м.с.}}$ . Линейные потери давления на участке длиной  $l$ , м, определяются по формуле Дарси – Вейсбаха

$$\Delta p_{\text{тр}} = Rl = \frac{\lambda}{d_{\text{вн}}} p_{\text{д}} l,$$

где  $R = \lambda p_{\text{д}} / d_{\text{вн}}$  – удельные потери давления, Па/м, которые могут быть рассчитаны по выражениям:

– для системы отопления

$$R = \frac{\lambda G^2}{1,62 \cdot 10^6 \rho_{\text{в}} \pi^2 d_{\text{вн}}^5}; \quad (1)$$

– для систем газоснабжения

$$R = \frac{\lambda \rho_{\text{г}} V_0^2}{1,62 \cdot 10^6 \pi^2 d_{\text{вн}}^5}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения;  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубы, м;  $p_{\text{д}} = \rho_{\text{в(г)}} w^2 / 2$  –

динамическое давление перемещаемой среды, Па;  $w$  – средняя скорость потока, м/с;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газа при нормальных условиях (н. у.), кг/м<sup>3</sup>;  $G$  – массовый расход воды на участке, кг/ч;  $V_0$  – объемный расход газа на участке, приведенный к н. у., м<sup>3</sup>/ч.

В этих выражениях в качестве исходных данных использованы расходы среды, так как в большинстве случаев именно они известны на начальном этапе гидравлического расчета.

Коэффициент сопротивления трения в общем случае зависит от двух факторов:

– эквивалентной (равномерно-зернистой) шероховатости стенок трубопровода  $k_{\text{э.кв}}$ , м;

– критерия Рейнольдса  $Re$ , показывающего отношение сил инерции к силам вязкого трения;  $Re = wd_{\text{вн}}/\nu$ , где  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости среды, м<sup>2</sup>/с.

После соответствующих преобразований получим следующие выражения для вычисления  $Re$ :

– для системы отопления

$$Re = \frac{G}{900 \rho_{\text{в}} \pi d_{\text{вн}} \nu}; \quad (3)$$

– для систем газоснабжения

$$Re = \frac{V_0}{900 \pi d_{\text{вн}} \nu}. \quad (4)$$

На основании опытов И. Никурадзе (1932–1933) общепринято выделять три характерных режима течения среды:

1) ламинарный ( $Re < 2000$ ), в котором шероховатость стенок не оказывает влияния на  $\lambda$ . Зависимость описывается законом Хагена – Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad (5)$$

2) переходный, в котором происходит переход от ламинарного к турбулентному течению ( $Re = 2000–4000$ ). Расчет  $\lambda$  выполняется по формуле Р. М. Зайченко

$$\lambda = 0,0025 \sqrt[3]{Re}; \quad (6)$$

3) турбулентный, где выделяют три области:

– гидравлически гладких труб, в которой шероховатость стенок не влияет на сопротивление трению, в качестве верхней границы числа Рейнольдса различными авторами предлагаются следующие значения:  $15d_{\text{вн}}/k_{\text{эКВ}}$  [1],  $23d_{\text{вн}}/k_{\text{эКВ}}$  [7],  $20d_{\text{вн}}/k_{\text{эКВ}}$  [8];

– переходную;

– квадратичную, или область вполне шероховатых труб, для которой  $\lambda$  не зависит от критерия Рейнольдса, а определяется только относительной шероховатостью  $k_{\text{эКВ}}/d_{\text{вн}}$ , в качестве нижней границы принимается  $\text{Re} = 560d_{\text{вн}}/k_{\text{эКВ}}$  [1],  $\text{Re} = 500d_{\text{вн}}/k_{\text{эКВ}}$  [4].

Для всей области турбулентного движения может быть применена степенная формула А. Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{\text{Re}} + \frac{k_{\text{эКВ}}}{d_{\text{вн}}} \right)^{0,25} \quad (7)$$

Следует отметить, что для различных областей турбулентного режима движения предложено множество эмпирических зависимостей: П. Блазиуса, Колбрука – Уайта, Прандтля – Никурадзе, Г. А. Мурина, Б. Л. Шифринсона, Филоненко – Альтшуля, С. Черчилля и пр. [1, 2, 9]. Однако выражение (7) охватывает всю область практического применения, просто в использовании и является универсальным.

Потери давления в местных сопротивлениях рассчитываются по формуле Вейсбаха

$$\Delta p_{\text{м.с}} = p_{\text{д}} \sum \zeta, \quad (8)$$

где  $\sum \zeta$  – сумма коэффициентов местного сопротивления.

Для большинства местных сопротивлений величина  $\zeta$  в турбулентном режиме не зависит от числа Рейнольдса ввиду незначительной величины вязкого трения по сравнению с потерями на вихреобразование. Однако для устройств с развитой поверхностью трение играет заметную роль. Для них зависимость потерь давления не будет пропорциональна квадрату скорости, и следовательно, пользоваться выражением (8) неправомерно. Потери давления в них

приводятся в виде таблиц, номограмм или с помощью аппроксимационных зависимостей.

Значения коэффициентов местного сопротивления приводятся в справочной литературе [10–12], а также в каталогах производителей. Значения некоторых коэффициентов местных сопротивлений в зависимости от номинального диаметра DN показаны в табл. 1.

Таблица 1

**Значения коэффициентов местного сопротивления элементов систем отопления и газоснабжения [10–12]**

**Values of local loss coefficients for elements of heating and gas supply systems [10–12]**

Вид местного сопротивления	Значение $\zeta$ для DN					
	15	20	25	32	40	50 и более
Внезапное изменение диаметра в пределах перехода на следующий диаметр по ГОСТ	Сужение – 0,35; расширение – 0,30. $\zeta$ относятся к скорости в сечении с меньшим диаметром					
Тройник проходной	1,0		Вне зависимости от диаметра. $\zeta$ относятся к скорости в сечении с меньшим расходом			
Тройник ответвления	1,5					
Тройник слияния	3,0					
Крестовина проходная	2,0					
Крестовина поворотная	3,0					
Отвод гнутый на 90° при $R/d = 3-4$	0,8	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3
Кран пробковый проходной	3,0	1,5	1,5	–	–	–
Кран шаровой полнопроходной	0,1–0,2					
Кран шаровой стандартного прохода	0,2–0,3					
Клапан термозапорный	2,0					
Клапан прямоточный	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,0
Задвижка	0,5 (DN 50–DN 100)					

Некоторые производители указывают не коэффициент местного сопротивления, а пропускную способность  $k_v$ , ( $\text{м}^3/\text{ч}/\text{бар}^{0,5}$ ) (в литературе зачастую встречается единица измерения  $\text{м}^3/\text{ч}$ , которая не совсем соответствует физическому смыслу  $k_v$ ) [11]. Величина  $k_v$  показывает объемный расход жидкости плотностью  $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ , проходящей через регулирующий орган или другое дросселирующее устройство,

при перепаде давлений  $10^5$  Па (1 бар) и определенной степени открытия (при максимальном открытии  $k_v$  называют условной пропускной способностью  $k_{vy}$  или  $k_{vs}$ ). Потери давления при этом определяются по выражению

$$\Delta p_{м.с} = 10^5 \left( \frac{G}{\rho_{ж} k_v} \right)^2, \quad (9)$$

где  $10^5$  – переводной коэффициент из единицы измерения бар в паскаль;  $G$  – массовый расход жидкости, кг/ч.

Зная пропускную способность, рассчитаем коэффициент местного сопротивления как

$$\zeta = \frac{16,2 \cdot 10^{-5} \pi^2 (DN)^4}{k_v^2}. \quad (10)$$

При расчете внутренних газопроводов принято определять эквивалентную длину местных сопротивлений  $l_{эKB}$ , м, по выражению

$$l_{эKB} = l_3 \sum \zeta, \quad (11)$$

где  $l_3 = d_{вн}/\lambda$  – эквивалентная длина единичного местного сопротивления, м.

В современной практике проектирования при гидравлическом расчете систем транспорта жидкостей и газов широко применяются номограммы, на которых для соответствующих диаметров трубопроводов графически связываются основные величины: расход (объемный или массовый) и удельные потери давления, при необходимости также наносятся изолинии скорости потока. Для систем отопления из медных трубопроводов в [4] приведены номограммы, называемые в документе «для приближенного гидравлического расчета». Однако они имеют ряд недостатков, основными из которых являются:

- использование зависимости от наружного диаметра без учета толщины стенки, что приводит к неточности в определении удельных потерь давления;
- крупный шаг делений шкал.

В результате исследований авторами были разработаны номограммы, построенные в логарифмических координатах, что существенно повышает их наглядность и удобство практиче-

ского применения. Номограмма для расчета систем отопления с использованием медных труб с наиболее часто применяемыми диаметрами представлена на рис. 1.

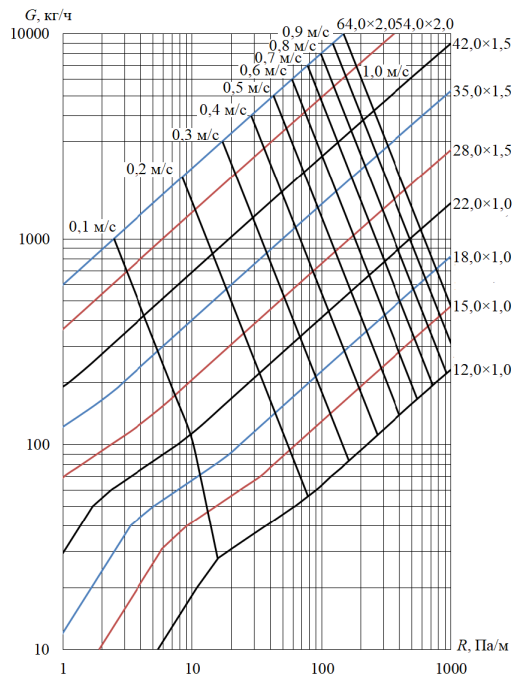


Рис. 1. Номограмма для гидравлического расчета систем отопления из медных трубопроводов ( $k_{эKB} = 0,01$  мм)

Fig. 1. Nomogram for hydraulic calculation of copper pipe heating systems ( $k_{eq} = 0.01$  mm)

В [5] приводятся две номограммы для расчета медных газопроводов природного газа:

- для расхода газа  $V_0 = 0,01–20,00$  м³/ч и удельных потерь давления на трение  $R = 0,1–5,0$  Па/м;
- для  $V_0 = 0–50$  м³/ч и  $R = 2–40$  Па/м.

Данное разделение, явившееся следствием построения номограмм в равномерной шкале, не всегда удобно. Также в [5] отсутствует номограмма для определения эквивалентной длины единичного местного сопротивления. Поэтому авторами настоящей статьи предлагаются построенные в логарифмических шкалах номограммы для определения величин  $R$  и  $l_3$  для природного газа и пропана (рис. 2, 3). Ограничение номограмм расходом 10 м³/ч выбрано, исходя из максимальных значений реальных расходов бытовыми потребителями.

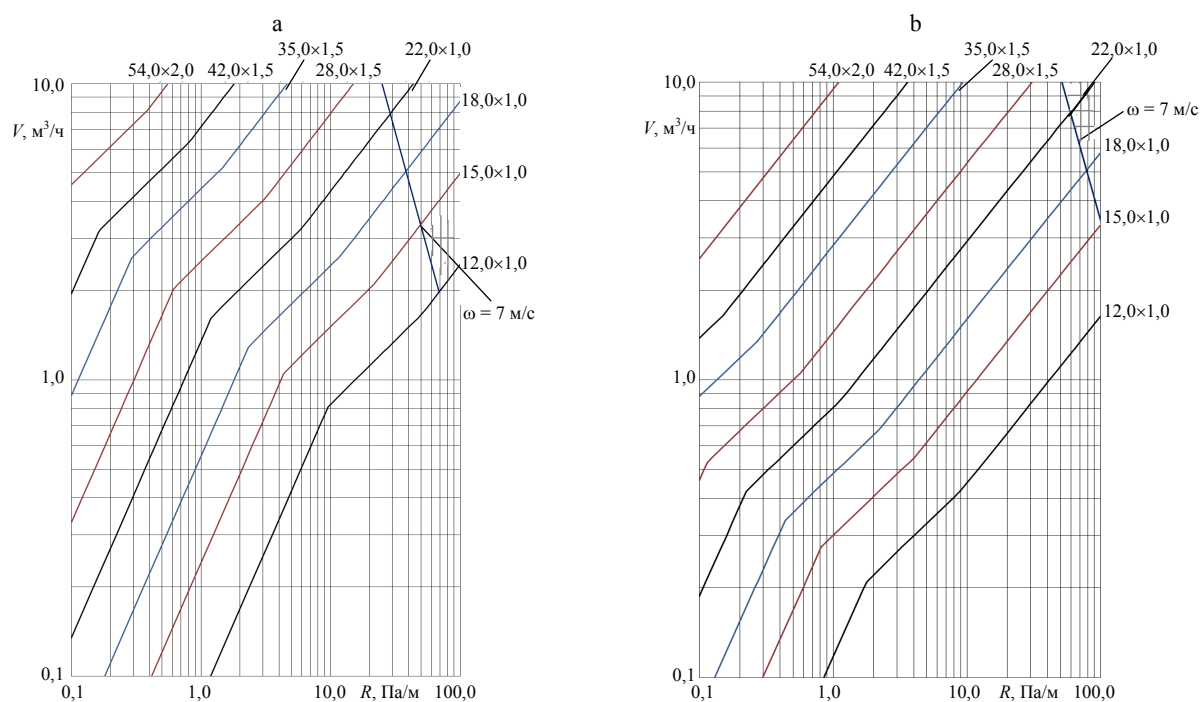


Рис. 2. Номограмма для гидравлического расчета внутренних медных газопроводов ( $k_{\text{экр}} = 0,01$  мм):  
а – для природного газа ( $\rho_0 = 0,73$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 14,3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с); б – для пропана ( $\rho_0 = 2,01$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 3,73 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с)

Fig. 2. Nomogram for hydraulic calculation of internal copper gas pipelines ( $k_{\text{eq}} = 0.01$  mm):  
а – for natural gas ( $\rho_0 = 0.73$  kg/m<sup>3</sup>,  $\nu = 14.3 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s); б – for propane ( $\rho_0 = 2.01$  kg/m<sup>3</sup>,  $\nu = 3.73 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s)

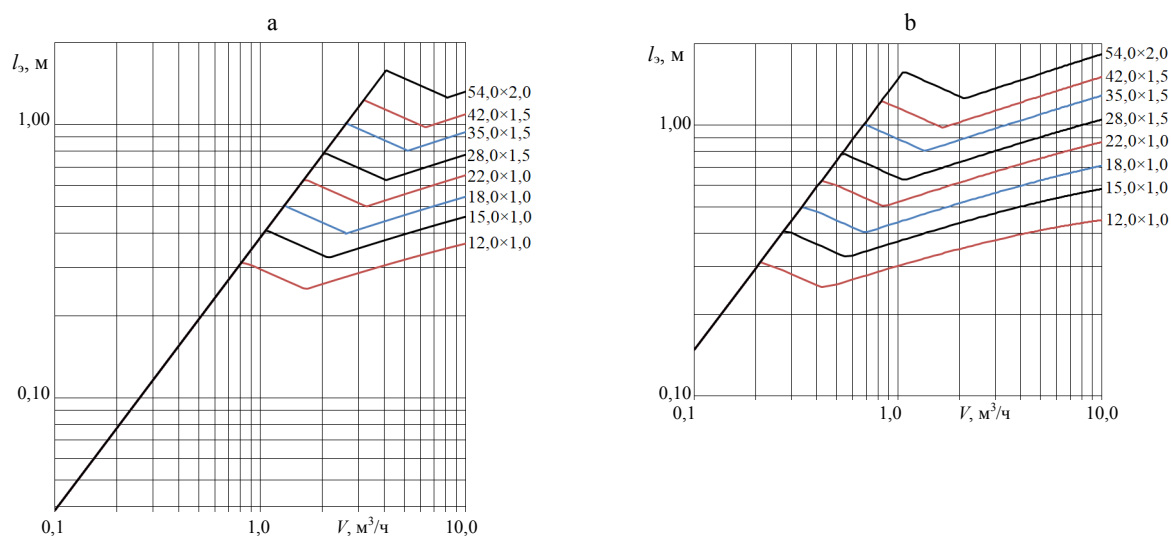


Рис. 3. Номограмма для определения эквивалентной длины единичного местного сопротивления  
для медных газопроводов ( $k_{\text{экр}} = 0,01$  мм): а – для природного газа ( $\rho_0 = 0,73$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 14,3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с);  
б – для пропана ( $\rho_0 = 2,01$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 3,73 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с)

Fig. 3. Nomogram for determination of equivalent length of single local loss  
for copper gas pipelines ( $k_{\text{eq}} = 0.01$  mm): а – for natural gas ( $\rho_0 = 0.73$  kg/m<sup>3</sup>,  $\nu = 14.3 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s);  
б – for propane ( $\rho_0 = 2.01$  kg/m<sup>3</sup>,  $\nu = 3.73 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s)

## ВЫВОДЫ

1. Достоинства, присущие медным трубопроводам, способствуют их постепенно увели-

чивающемуся распространению во внутренних санитарно-технических системах и во внутридомовом газоснабжении, особенно для индивидуальных жилых домов и коттеджей.

2. Требования по проектированию и методу гидравлического расчета систем из медных трубопроводов в нормах Республики Беларусь отсутствуют. Ввиду этого необходима разработка соответствующих ТНПА.

3. На основании законов механики жидкости и газа разработаны отличающиеся от существующих номограммы, использование которых позволит упростить и ускорить расчет систем отопления и внутреннего газоснабжения.

## ЛИТЕРАТУРА

- Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
- 2009 ASHRAE Handbook. Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009. 880 p.
- Hydraulic Services Design Guide. EN 1057. 1<sup>st</sup> Ed. Australia: International Copper Association Australia, 2014. 21 p.
- Проектирование и монтаж внутренних систем водоснабжения и отопления зданий из медных труб: СП 40-108-2004. Введ. 01.11.2005. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 23 с.
- Авласевич, А. И. Гидравлический расчет внутренних газопроводов из медных труб / А. И. Авласевич, И. Б. Оленев // Фундаментальные исследования. 2017. № 9 (Ч. 1). С. 9–13.
- Газораспределение и газопотребление. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-4.03-267-2012\* (02250). Взамен СНБ 4.03.01-98. Введ. 01.12.2012. Минск: Минстройархитектуры, 2015. 102 с.
- Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб: СП 42-101-2003. Взамен СП 42-104-97. Введ. 08.07.2003. М.: ЗАО «Полимергаз», 2006. 182 с.
- Борисов, С. Н. Гидравлические расчеты газопроводов / С. Н. Борисов, В. В. Даточный. М.: Недра, 1972. 108 с.
- Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие / С. С. Кутателадзе. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
- Внутренние санитарно-технические устройства: в 3 ч. / В. Н. Богословский [и др.]; под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. М.: Стройиздат, 1990. Ч. 1: Отопление. 344 с.
- Покотилов, В. В. Пособие по расчету систем отопления / В. В. Покотилов. Вена: HERZ Armaturen, 2006. 144 с.
- Ионин, А. А. Газоснабжение / А. А. Ионин. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989. 439 с.
- Трубы медные и латунные круглого сечения общего назначения. Технические условия: ГОСТ 617-2006.

Взамен ГОСТ 617-90. Введ. 01.11.2007. Минск: Госстандарт, 2007. 34 с.

Поступила 26.04.2018

Подписана в печать 11.07.2018

Опубликована онлайн 30.11.2018

## REFERENCES

- Idelchik I. E., Shteinberg M. O. (ed.) (1992) *Handbook of Hydraulic Resistances*. 3<sup>rd</sup> ed. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 672 (in Russian).
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2009) *2009 ASHRAE Handbook. Fundamentals*. 880.
- Hydraulic Services Design Guide. EN 1057*. 1<sup>st</sup> ed. Australia, International Copper Association Australia, 2014. 21.
- SP [Construction Rules] 40-108-2004. *Designing and Installation of internal Systems for Water Supply Andheating of Buildings while Using Copper Pipes*. Moscow, Federal State Unitary Enterprise Centre of Design Products, 2005. 23 (in Russian).
- Avlasevich A. I., Olenov I. B. (2017) Hydraulic Calculation of Internal Gas-Supply Lines Made of Copper Pipes. *Fundamentalnye Issledovaniya = Fundamental Research*, (9), 9–13 (in Russian).
- TKP [Technical code of Common Practice] 45-4.03-267-2012\* (02250). *Gas Distribution and Gas Consumption. Construction Design Norms*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2015. 102 (in Russian).
- SP [Construction Rules] 42-101-2003. *General Provisions on Designing and Construction of Gas-Distribution Systems Made of Metallic and Polyethylene Pipes*. Moscow, CJSC "Polymergaz", 2006. 182 (in Russian).
- Borisov S. N., Datochny V. V. (1972) Hydraulic Calculations of Gas Pipelines. Moscow, Nedra Publ. 108 (in Russian).
- Kutateladze S. S. (1990) *Heat transfer and Hydrodynamic Resistance*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 367 (in Russian).
- Bogoslovskii V. N., Krupnova B. A., Skanavi A. N., Egiazarov A. G., Mikhailov L. M., Nevskii V. V., Moor L. F., Shil'krot E. O., Naumov A. L., Finkel'shtein S. M., Kharchenko N. V., Vasil'ev S. S., Ivyanskii A. Z., Staroverova N. I., Varfolomeeva A. P., Shiller Yu. I. (1990) *Internal Sanitary and Technical Devices: Part 1. Heating*. Moscow, Stroyizdat Publ. 344 (in Russian).
- Pokotilov V. V. (2006) *Textbook for Calculation of Heating Systems*. Vienna, HERZ Armaturen. 144 (in Russian).
- Ionin A. A. (1989) *Gas Supply*. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Stroyizdat Publ. 439 (in Russian).
- State Standard 617-2006. *Copper and Brass Pipes of Circular Section for General Purpose. Technic Specifications*. Minsk, Gosstandart Publ. 34 (in Russian).

Received: 26.04.2018

Accepted: 11.07.2018

Published online: 30.11.2018