

**ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И
ОСВЕЩЕНИЕ / HEATING, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS SUPPLY AND LIGHTING**

КРАТКИЙ АНАЛИЗ СТАНОВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ГАЗОВЫХ СЕТЕЙ

Научная статья

Филатова Е.Б.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-5498-5595;

¹ Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ele51763539[at]yandex.ru)

Аннотация

Данная работа посвящена анализу существующих методик гидравлического расчета газопроводов и применяемого инструментария. Использование общих уравнений газовой динамики трактуется с учетом эксплуатационной специфики газораспределительных сетей, включая надежную и бесперебойную подачу газа всем потребителям, а также минимизации затрат на аварийно-восстановительные работы. В основу исследования вопросов движения газа по трубопроводным системам и специфики формирования газотранспортной сети легли научные труды С.Н. Борисова, В.В. Даточного, Н.А. Скафтымова, А.А. Ионина, Н.Л. Стаскевича, И.Я. Фурмана и В.А. Смирнова. Проведенный анализ показал необходимость в корректировке методов расчета и актуализации графических материалов, используемых при расчете.

Ключевые слова: гидравлический расчет, режимы течения газа, номограммы «с касанием», сетчатые номограммы, надежность газовой сети.

A SUMMARY OF THE DEVELOPMENT OF HYDRAULIC CALCULATION OF GAS NETWORKS

Research article

Filatova E.B.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-5498-5595;

¹ Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (ele51763539[at]yandex.ru)

Abstract

This work is dedicated to the analysis of existing methods of hydraulic calculation of gas pipelines and applied tools. The use of general equations of gas dynamics is considered taking into account the operational specifics of gas distribution networks, including reliable and uninterrupted gas supply to all consumers, as well as minimizing the costs of emergency and repair work. The basis for the research of the issues of gas flow through pipeline systems and the specifics of gas transmission network formation were the scientific works of S.N. Borisov, V.V. Datochny, N.A. Skaftymov, A.A. Ionin, N.L. Staskevich, I.Y. Furman and V.A. Smirnov. The analysis has shown the necessity to adjust the calculation methods and update the graphical materials used in the calculation.

Keywords: hydraulic calculation, gas flow regimes, touch nomograms, grid nomograms, gas network reliability.

Введение

На сегодняшний день Россия – самая газифицированная страна в мире и это с учетом таких территорий как Сибирь с ее вечной мерзлотой, удаленный Север, Дальний Восток. Уровень газификации РФ к началу 2023 года достиг 75%. А в связи со сложившейся политико-экономической ситуацией в мире и высвобождением ресурсов для внутреннего использования эта цифра стремительно растет. В рамках государственной Программы газификации населения к 2030 году она достигнет более 83%. С увеличением протяженности газовых сетей и ростом потребления газа вопрос надежности систем встает как никогда остро. Большинство аварийных инцидентов и минимизацию их последствий можно предусмотреть и спрогнозировать еще на стадии проектирования сетей газораспределения. Выявление достоинств и недостатков основных закономерностей и принципов проектирования систем газоснабжения – тема актуальная и современная, так как в настоящее время существует несколько расчетных методик, дающих различные результаты.

Методы и принципы исследования

Для строительства магистральных, районных, уличных, внутриквартальных и внутренних газовых сетей требуется определять диаметры и сопротивление сетей с целью обеспечения бесперебойного снабжения потребителей газом.

Методику расчета разрабатывал целый ряд ученых, таких как С.Н. Борисов, Н.А. Скафтымов, А.А. Ионин, Н.Л. Стаскевич, Г.Н. Северинец и другие, предлагающие формулы для определения потерь давления с параметрами, имеющими размерности в различных системах единиц (в системе Си и в технической системе). Однако все они для своих выводов использовали три основных уравнения гидравлики [1], после совместного решения которых, и ряда преобразований, получены две основные формулы для определения сопротивления газопроводов среднего (высокого) (1) и газопроводов низкого давления (2) [10].

$$P_H^2 - P_K^2 = 1,62 \cdot P_0 \cdot \lambda \cdot \frac{Q_0^2}{d^5} \cdot \rho_0 \cdot \frac{T}{T_0} \cdot l \cdot Z \quad (1)$$

$$P_H - P_K = 0,81 \cdot \lambda \cdot \frac{Q_0^2}{d^5} \cdot \rho_0 \cdot \frac{T}{T_0} \cdot l \quad (2)$$

где P_0 , P_H и P_K – соответственно атмосферное и абсолютное давление в начале и в конце газопровода, МПа; Q_0 – расход газа при нормальных условиях, м³/ч; ρ_0 – плотность газа при нормальных условиях, кг/м³; T и T_0 – температура газа фактическая и при нормальных условиях, К; l – расчетная длина газопровода постоянного диаметра d , м; Z – коэффициент сжимаемости, учитывающий отклонение в поведении природных газов от законов идеальных газов.

Газ, при транспорте газа по газопроводам любого диаметра и длины принимает температуру окружающей среды, которая на протяжении некоторого отрезка времени $\Delta\tau$ является величиной постоянной. В связи с этим можно считать, что транспорт газа является процессом изотермическим. Коэффициент сжимаемости Z учитывается только при давлении газа более 1,2 МПа [5]. После корректировки формулы (1) и (2) принимают вид [10]:

$$P_H^2 - P_K^2 = 1,62 \cdot P_0 \cdot \lambda \cdot \frac{Q_0^2}{d^5} \cdot \rho_0 \cdot l \quad (3)$$

$$P_H - P_K = 0,81 \cdot \lambda \cdot \frac{Q_0^2}{d^5} \cdot \rho_0 \cdot l \quad (4)$$

При изучении влияния режимов течения газа и качества внутренней поверхности газопроводов на гидравлическое сопротивление газовой сети много вопросов возникло при определении коэффициента гидравлического трения λ .

Сначала И. Никурадзе и Л. Прандтль считали, что этот коэффициент λ можно определить по величине абсолютной средней шероховатости труб n . Однако, последующие исследования показали, что значение λ изменяется еще в зависимости от характера движения газа.

Анализ, проведенный С.Н. Борисовым и В.В. Даточным, показал хорошую сходимость для гидравлически гладких стенок труб, хотя в областях больших и малых значений Рейнольдса Re и для шероховатых стенок расхождение результатов, полученных по этим формулам значительное. Окончательный выбор был отдан формуле К.Ф. Коулбрука (5) как теоретически обоснованной.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{n}{3,7 \cdot d} \right) \quad (5)$$

Дальнейшая работа в этом направлении велась в рамках уточнения формулы К.Ф. Коулбрука. В итоге ряда преобразований и обработки результатов опытов И.Г. Блазиусом, Р.М. Зайченко, П.К. Конаковым и А.Д. Альтшулем были получены достаточно простые формулы для определения λ с высокой степенью точности:

- при $Re \leq 2000$:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

- при $2000 < Re \leq 4000$:

$$\lambda = 0,0025 \sqrt[3]{Re} \quad (7)$$

- при $4000 < Re \leq 100000$:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (8)$$

- при $Re > 100000$:

$$\lambda = \frac{1}{(1,82 \cdot \lg Re - 1,64)^2} \quad (9)$$

- для гидравлически шероховатых стенок при $Re > 4000$:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{n}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (10)$$

В 1959 году С.Н. Борисов разработал номограммы сетчатого типа [2] для подбора диаметров газопроводов низкого давления и номограммы (см. рис. 1) «с контактом касания, состоящие из двух шкал и семейства дуг» [3], составленные по методу Джемс-Леви-Немцовой-Нартовой [4], [6].

Позднее для гидравлического расчета газопроводов среднего и высокого давлений были составлены номограммы сетчатого типа [9] (см. рис. 2), использование которых из-за простоты оказалось предпочтительнее номограмм «с касанием».

При использовании номограммы сетчатого типа рекомендуется принимать скорости газа, приведенные к нормальным условиям, не более 15 м/с [8]. Сотрудниками СамГТУ было предложено принять ступенчатое изменение этой скорости в зависимости от давления газа и, в соответствии с этим, ограничить области использования данной номограммы [8]. Аналогичные корректировки были проведены и для номограмм, используемых при расчете газопроводов низкого давления с учетом максимальной скорости газа 7 м/с [7].

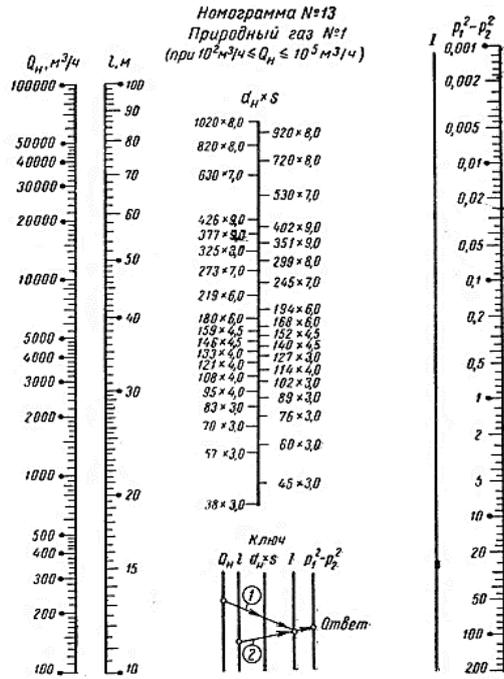


Рисунок 1 - Номограмма для определения потерь давления в газопроводах среднего и высокого давления (С.Н. Борисов)

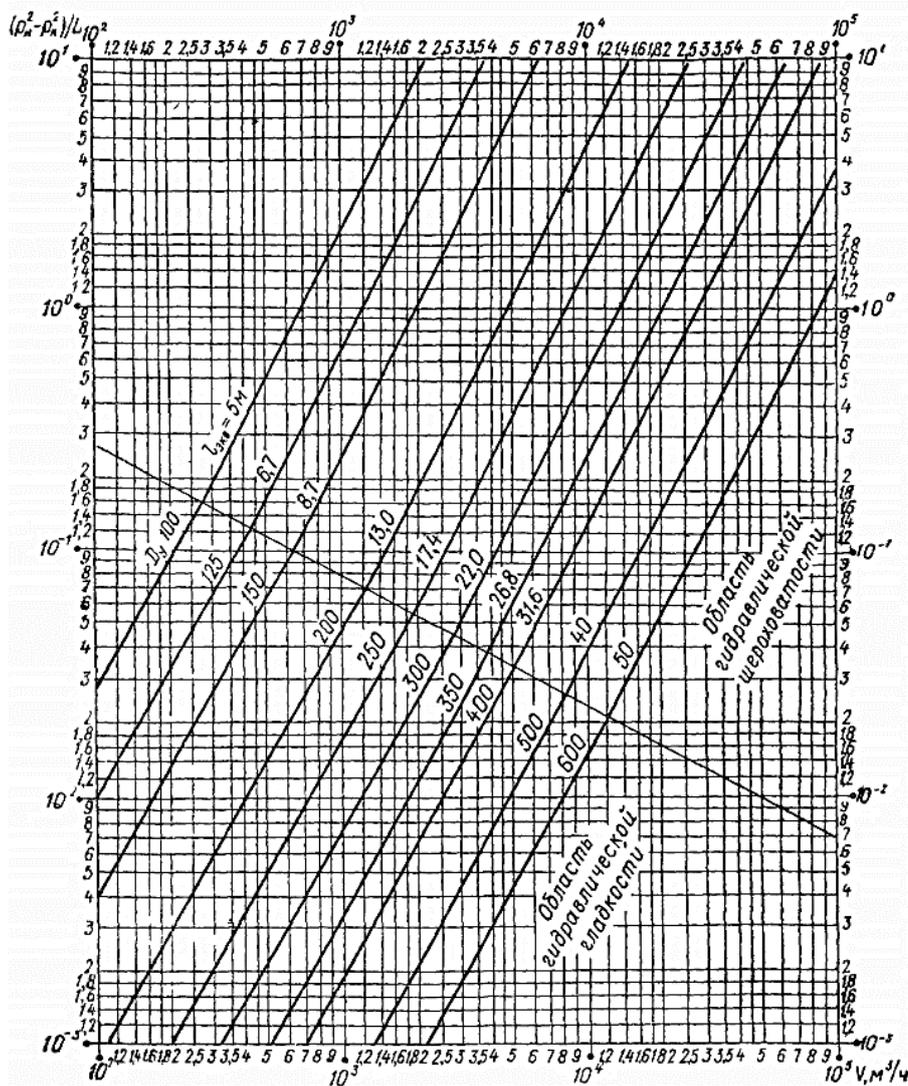


Рис. VI. 7. Номограмма для определения потерь давления в газопроводах $D_y = 100 \div 600$ мм среднего и высокого давлений (природный газ, $\rho = 0,73$ кг/м³, $\nu = 14,3 \cdot 10^{-6}$ м²/сек).

Рисунок 2 - Номограмма для определения потерь давления в газопроводах среднего и высокого давления (Н.А. Скафтымов)

Как известно, существует три типа газовых сетей, это тупиковая сеть, кольцевая сеть и смешанная. А.А. Ионин показал, что для гидравлического расчета любых типов газовых сетей необходимо составлять некоторое число уравнений гидравлических потерь при постоянной потере давления в сети, исходя из условий, аналогичных I и II законам Кирхгофа для электрических сетей.

Так, в соответствии с первым условием, алгебраическая сумма расходов в любом узле сети равна нулю:

$$\sum_{j=1}^j \pm Q_j = 0 \tag{11}$$

Согласно второму условию требуется, чтобы алгебраическая сумма потерь напора в любом замкнутом контуре сети равнялась нулю:

$$\sum_{i=1}^i \pm \Delta p_i = 0 \tag{12}$$

На практике, после определения диаметров газопроводов, в связи наложением ограничений по их выбору, второе условие для некоторых колец не выполняется [5] и требуется пересчет сети для определения истинного потокораспределения.

В МИСИ им. В.В. Куйбышева была разработана методика определения оптимальной пропускной способности и радиуса действия одного ГРП с точки зрения количества потребителей, удельного расхода газа на одного человека,

допустимого падения давления в сети и стоимости одного ГРП [5], и, как следствие, определение количества равнонагруженных ГРП. Позднее А.А. Ионин ввел параметр капитальных вложений в строительство и расходы на эксплуатацию и доказал, что наиболее экономичной является тупиковая сеть.

Однако, в случае аварии на одном участке тупиковой сети, все потребители, присоединенные после этого участка, не получают газ. Аккумулирующая способность газовых сетей, независимо от давления в них, крайне мала и не может быть резервом газа для потребителей. Таким образом, появляется еще одна характеристика сети, это надежность бесперебойной подачи газа потребителям.

Работы по ликвидации аварии на сетях среднего и высокого давлений даже при снижении давления в газопроводе до минимума не позволят доставить газ до некоторых ГРП, а, следовательно, все потребители, питающиеся от этих ГРП не получают газ. Может возникнуть коллапс. Повторный пуск газа к потребителям – процесс длительный и затратный. Поэтому сети среднего и высокого давлений делают в основном кольцевыми для обеспечения надежности. В сетях низкого давления ситуация аналогичная, хотя и менее дорогостоящая. На основании выше изложенного, как правило, выполняют смешанную схему подачи газа с давлением до 1,2 МПа к потребителям, включающую в себя кольцевые сети и отдельные тупиковые участки, тем самым повышая надежность работы сети.

Разработанную МИСИ методику расчета тупиковых и кольцевых газовых сетей разные ученые дорабатывали, вносили некоторые дополнения и изменения. Принципиально методика расчета состояла в определении путевых и расчетных расходов газа по отдельным участкам и в назначении диаметров газопроводов на всех участках газовой сети при допустимых потерях давления. А.А. Ионин [5] предложил этот способ считать первым этапом расчета кольцевых сетей низкого давления. В качестве второго этапа он рекомендует модернизировать разработанную сеть для повышения ее надежности. Для этого он применяет метод ранжирования колец, определяя их материальную характеристику M и осредненный диаметр d_{cp} по формулам (12), (13).

$$M = \sum d_i l_i \quad (13)$$

$$d_{cp} = \frac{M}{\sum l_i} \quad (14)$$

Изначально определяют диаметры участков кольца первого ранга, принимая большие и меньшие значения ближайших типоразмеров по отношению к осредненному диаметру. Для колец второго ранга диаметры подбирают исходя из полного использования допустимого падения давления в сети, при этом не изменяя диаметры смежных участков с кольцом первого ранга.

В результате на конечных участках сети (в точках встречи газовых потоков) диаметры могут получиться сколько угодно малыми, и в случае аварийной ситуации эти участки не смогут обеспечить пропуск газа на последующие участки из-за малой пропускной способности. В этом случае будет нарушен основной принцип надежности газовой сети.

Заключение

В настоящее время по формулам для гидравлического расчета газопроводов разработаны алгоритмы, и составлены программы расчета, обеспечивающие практически мгновенный подбор диаметров и определение сопротивлений участков газовых сетей. Основным недостатком всех имеющихся разработок – они не рассматривают сети как единое целое, вследствие чего требуется внесение правок с последующей увязкой и проверкой полноты использования расчетных перепадов напора в сети.

Кроме того, применяемые номограммы и таблицы не учитывают изменение скоростей газа в зависимости от изменения давления и, как следствие, плотностей природного газа различных составов. Данные изменения особо явно сказываются на транспорте газа в сетях среднего (высокого) давления. Поэтому автором предложены кривые, наносимые на существующие номограммы и ограничивающие области их применения в зависимости от рекомендуемых скоростей газа для трубопроводов различного давления [7].

Для гидравлического расчета сетей среднего (высокого) давления на номограмму необходимо дополнительно нанести кривые, ограничивающие область ее применения в зависимости от абсолютного давления газа [8].

По скорректированным автором номограммам был произведен гидравлический расчет реконструируемого тупикового газопровода среднего давления поселка Мехзавод города Самары. Это привело к увеличению диаметра сети на конечных точках трассы и его уменьшению в районе точки подключения, при этом средний диаметр сети остался неизменным. Таким образом, материальные затраты на строительство сети были уменьшены на 12% и появился резерв по пропускной способности реконструируемого участка. Что, в свою очередь, дает возможность подключения новых абонентов без существенных потерь давления в сети.

В связи с вышеизложенным необходимо внести корректировку в методику гидравлического расчета газовых сетей, на что и будут направлены дальнейшие изыскания автора.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. — М.: Недра, 1982. — 224 с.
2. Борисов С.Н. Номограммы для гидравлического расчета газопроводов низкого и высокого давлений / С.Н. Борисов // Научно-технический и производственный журнал «Водоснабжение и санитарная техника». — 1959. — № 8. — С. 40.
3. Борисов С.Н. О номограммах с контактом касания для некоторых эмпирических зависимостей / С.Н. Борисов // Вычислительная математика. — 1959. — № 5.
4. Джеймс-Леви Г.Е. О функциях, номограммы которых имеют заданную ответную шкалу / Г.Е. Джеймс-Леви // Вычислительная математика. — 1959. — № 5.
5. Ионин А.А. Газоснабжение / А.А. Ионин. — М.: Стройиздат, 1965. — 448 с.
6. Немцова-Нартова Л.Г. Номографирование уравнений третьего номографического порядка / Л.Г. Немцова-Нартова // Вычислительная математика. — 1960. — № 6.
7. Новопашина Н.А. Использование номограмм для гидравлического расчета газопроводов / Н.А. Новопашина, Е.Б. Филатова, О.А. Баландина // Международный научно-исследовательский журнал. — 2022. — № 1(115). — Часть 1. — С. 55-61. — DOI: 10.23670/IRJ.2022.115.1.010.
8. Новопашина Н.А. Характерные кривые, ограничивающие область применения номограммы среднего давления для расчета газопроводов / Н.А. Новопашина, Е.Б. Филатова, О.А. Баландина // Международный научно-исследовательский журнал. — 2022. — № 3(117). — Часть 1. — С. 67-74. — DOI: 10.23670/IRJ.2022.117.3.010.
9. Скафтымов Н.А. Основы газоснабжения / Н.А. Скафтымов. — Л.: Недра, 1975. — 343 с.
10. СП 42-101-2003. Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб / А.Л. Шурайц, В.С. Волков, В.Е. Удовенко [и др.]. — Введ. 2003-07-08. — М.: ГУП ЦПП, 2003. — 68 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Al'tshul' A.D. Gidravlicheskie soprotivleniya [Hydraulic Resistances] / A.D. Al'tshul'. — М.: Nedra, 1982. — 224 p. [in Russian]
2. Borisov S.N. Nomogrammy dlya gidravlicheskogo rascheta gazoprovodov nizkogo i vysokogo davlenii [Nomograms for Hydraulic Calculation of Low and High Pressure Gas Pipelines] / S.N. Borisov // Nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyi zhurnal «Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika» [Scientific, Technical and Industrial Journal "Water Supply and Sanitary Engineering"]. — 1959. — № 8. — P. 40. [in Russian]
3. Borisov S.N. O nomogrammakh s kontaktom kasaniiya dlya nekotorykh ehmpiricheskikh zavisimostei [On Nomograms with Touch Contact for Some Empirical Dependencies] / S.N. Borisov // Vychislitel'naya matematika [Computational Mathematics]. — 1959. — № 5. [in Russian]
4. James-Levi G.E. O funktsiyakh, nomogrammy kotorykh imeyut zadannuyu otvetnyuyu shkalu [About Functions Whose Nomograms Have a Given Response Scale] / G.E. James-Levi // Vychislitel'naya matematika [Computational Mathematics]. — 1959. — № 5. [in Russian]
5. Ionin A.A. Gazosnabzhenie [Gas Supply] / A.A. Ionin. — М.: Stroizdat, 1965. — 448 p. [in Russian]
6. Nemtsova-Nartova L.G. Nomografirovanie uravnenii tret'ego nomograficheskogo poryadka [Nomography of Equations of the Third Nomographic Order] / L.G. Nemtsova-Nartova // Vychislitel'naya matematika [Computational Mathematics]. — 1960. — № 6. [in Russian]
7. Novopashina N.A. Ispol'zovanie nomogramm dlja gidravlicheskogo rascheta gazoprovodov [Using Nomograms for Hydraulic Calculation of Gas Pipelines] / N.A. Novopashina, E.B. Filatova, O.A. Balandina // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2022. — № 1(115). — Pt. 1. — P. 55-61. — DOI: 10.23670/IRJ.2022.115.1.010. [in Russian]
8. Novopashina N.A. Kharakternye krivye, ogranichivayushchie oblast' primeneniya nomogrammy srednego davleniya dlya rascheta gazoprovodov [Characteristic Curves Limiting the Scope of the Average Pressure Nomogram for Calculating Gas Pipelines] / N.A. Novopashina, E.B. Filatova, O.A. Balandina // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Research Journal]. — 2022. — № 3(117). — Pt. 1. — P. 67-74. — DOI: 10.23670/IRJ.2022.117.3.010. [in Russian]
9. Skaftymov N.A. Osnovy gazosnabzheniya [Basics of Gas Supply] / N.A. Skaftymov. — L.: Nedra, 1975. — 343 p. [in Russian]
10. SP 42-101-2003. Obshchie polozheniya po proektirovaniyu i stroitel'stvu gazoraspre delitel'nykh sistem iz metallicheskih i poliehtilenovykh trub [The General Provision and Construction Gas Distribution System from Steel and Polyethylene Pipes] / A.L. Shurait, V.S. Volkov, V.E. Udovenko [et al.]. — Introduced. 2003-07-08. — М.: Center for design products in construction, 2003. — 68 p. [in Russian]