

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-359-371>

УДК 620.9-62-93

Региональная система газоснабжения с позиций системного анализа и закономерности ее функционирования

Д. Р. Мороз¹⁾, Н. В. Грунтович¹⁾

¹⁾Государственное предприятие «НИИ Белгипротопгаз» (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. Изучение структуры и закономерностей функционирования региональных систем газоснабжения необходимо для решения ряда эксплуатационных задач, основными из которых являются: составление заявок планируемого объема поставок газа; разработка проектов развития и реконструкции систем газоснабжения и хранения газа; формирование действующих тарифов на газ для различных групп потребителей. Региональная система газоснабжения рассмотрена с позиций системного анализа и представлена как сложная динамическая система, состоящая из нескольких подсистем. Исследованы балансовая структура потребления газа в регионе за десятилетний период и закономерности суточного потребления газа в регионе в зависимости от среднесуточной температуры наружного воздуха за двухлетний период. Установлено, что наибольшую долю в суммарном потреблении газа составляют энергетический комплекс, промышленность и сельское хозяйство. Рассчитаны значения коэффициентов корреляции между температурой наружного воздуха и расходом газа по элементам балансовой структуры. Для суточных значений расхода газа на нужды населения и жилищно-коммунального хозяйства отмечается самый высокий коэффициент корреляции между исследуемыми признаками $R = (-0,98; -0,96)$. Анализ полей соответствия суточного потребления газа в регионе среднесуточной температуре на годовом интервале времени позволил выделить две характерные области: область работы системы отопления и область положительных температур (система отопления отключена). Для каждой из областей определены зависимости суточного расхода газа от температуры и влияние изменения температуры на изменение потребления газа. Установлено, что диапазон температур от 0 до 10 °C соответствует зоне неопределенного состояния региональной системы газоснабжения, так как в этой зоне перекрываются две области: область работы системы отопления и область положительных температур.

Ключевые слова: балансовая структура системы газоснабжения, режим подачи газа, поле суточного потребления газа в зависимости от температуры, область работы системы отопления, область положительных температур, зона неопределенного состояния

Для цитирования: Мороз, Д. Р. Региональная система газоснабжения с позиций системного анализа и закономерности ее функционирования / Д. Р. Мороз, Н. В. Грунтович // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 4. С. 359–371. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-359-371>

Адрес для переписки

Мороз Денис Равильевич
Государственное предприятие
«НИИ Белгипротопгаз»
пер. Домашевский, 11а,
220036, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 202-81-39
frostden@list.ru

Address for correspondence

Moroz Denis R.
State Enterprise
“Research Institute “Belgiprotopgaz”
11a Domashevskij lane,
220036, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 202-81-39
frostden@list.ru

Regional Gas Supply System Considered from the Standpoint of System Analysis and Regularities of its Functioning

D. R. Moroz¹⁾, N. V. Hruntovich¹⁾

¹⁾State Enterprise “Research Institute “Belgiprotogaz” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Investigation of the structure and the functional patterns of the regional gas supply systems is necessary for addressing a number of operational tasks, the main ones being the following: preparing requisitions for the planned volume of gas deliveries, project design for development and reconstruction of gas supply systems and gas storage facilities, developing of functional gas tariffs for different groups of customers. The regional gas supply system is considered from the standpoint of system analysis and presented as a complex dynamic system consisting of several subsystems. The balance structure of gas consumption in the region for the ten-year period and the patterns of daily gas consumption in the region depending on the average daily outdoor temperature for the two-year period have been studied. It is discovered that the power economy, industry and agriculture account for the largest share in the total gas consumption. The values of correlation coefficients between the outdoor air temperature and gas flow rate according to the elements of the balance structure are calculated. For the daily values of gas consumption for the needs of the population and housing-and-communal services, the highest correlation coefficient between the studied characteristics R is noted = $(-0,98(-0,96))$. Analysis of the matching fields of daily gas consumption in the region to the daily average temperature over a given one-year timeframe made it possible to identify two key areas, viz.: the area of operation of the heating system and the area of positive temperatures (the heating system is off). For each of the areas, the dependences of the daily gas flow rate on the temperature and the effect of temperature changes on the gas consumption alteration were determined. It was found out that the temperature range from 0 to 10 °C corresponds to the zone of uncertain state of the regional gas supply system, since two areas overlap in this zone, viz.: the area of operation of the heating system and the area of positive temperatures.

Keywords: balance structure of gas supply system, gas supply modes, field of daily gas consumption depending on temperature, heating system functioning area, positive temperature area, zone of an uncertain state

For citation: Moroz D. R., Hruntovich N. V. (2018) Regional Gas Supply System Considered from the Standpoint of System Analysis and Regularities of its Functioning. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (4) 359–371. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-359-371> (in Russian)

Введение

Структура топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь представлена системами газоснабжения, снабжения нефтью и нефтепродуктами, системой производства электрической, тепловой энергии и их транспортировкой конечным потребителям. Региональные системы газоснабжения (РСГС), входящие в газоснабжающий комплекс страны, являются сложными технологическими системами, обеспечивающими устойчивое функционирование всех отраслей хозяйствования. Вопросам функционирования и развития РСГС посвящены современные публикации российских и зарубежных ученых [1–7]. Мотивацией к изучению структуры и закономерностей функционирования РСГС и системы газоснабжения республики в целом являются такие задачи, как [7, 8]: составление заявок

планируемого объема поставок газа; разработка проектов развития и реконструкции систем газоснабжения и хранения газа; формирование действующих тарифов на газ для различных групп потребителей при учете рентабельности их производств.

Системный подход в энергетике

Использование системного подхода применительно к энергетике было заложено в 60-е гг. прошлого столетия академиком Л. А. Мелентьевым [9] и развито в трудах его учеников и последователей [1–3]. Системный подход, или комплексность исследований, предполагает всестороннее рассмотрение изучаемой системы с учетом ее внешних и внутренних связей, всех возможных целей, критериев управления, разнообразных ограничений и последствий от принимаемых решений [9].

Согласно классификации А. Л. Мелентьева, главные системы энергетики (в том числе система газоснабжения) принадлежат к большим человеко-машинным системам особого класса, обладающим такими признаками, как [9]:

- 1) тесная взаимозависимость развития всей совокупности систем энергетики;
- 2) материальность связей основных элементов систем (для системы газоснабжения – это трубопроводная связь);
- 3) непрерывность, а часто и неразрывность процессов производства, транспортировки и потребления ресурсов;
- 4) сложность целенаправленного равновесного движения систем, определяемого не только взаимосвязью процессов, но и требованиями надежного функционирования и развития.

Смысл и содержание системного подхода, предложенного Л. А. Мелентьевым, конкретизируется путем выделения таких четырех компонент, как [9]:

- изучение и учет внешних связей рассматриваемой системы;
- иерархическое представление о внутренней структуре сложных объектов и процессах управления ими;
- учет неопределенностей, обусловленных неполнотой исходной информации, многокритериальностью и другими факторами;
- применение математических методов и ЭВМ.

Системные исследования в энергетике могут быть представлены тремя большими областями, каждая из которых включает по несколько направлений [9]. Первая область – это теоретические основы системных исследований в энергетике. Главные направления исследований в данной области: закономерности и тенденции развития систем энергетики; свойства больших систем энергетики; совершенствование методов системного анализа; проблемы информации и автоматизированные системы управления. Вторая область объединяет направления научных исследований, связанные

с управлением развитием и функционированием систем энергетики. Третья область – это комплексные проблемы энергетики. Очевидно, что первая область призвана обеспечить научную базу и разработку общих принципов и методов для других направлений. Нельзя управлять системой без знаний общих закономерностей ее функционирования.

Следует сразу выделить два наиболее важных свойства системы [1, 2]. Одно из них характеризует качество системы как объекта исследования – это эмерджентность, а второе – инерционность системы (один из принципов развития). Эмерджентность – одна из форм проявления диалектического закона перехода количественных изменений в качественные [6]. О том, что объединение элементов создает новое качество, человечество знало давно, еще со времен Аристотеля. Чем проще система, чем из меньшего числа элементов и связей она состоит, тем меньше проявляет она системное качество; и чем сложнее система, тем более непохожим является ее системный эффект по сравнению со свойствами каждого элемента. Принцип инерции системы – способность системы изменять свой потенциал через некоторое время после начала воздействия на нее со стороны внутренней или внешней среды, а завершение изменений в системе будет происходить также через какое-то время после окончания воздействия. Очень важно знать факторы, влияющие на инерционность системы.

Региональная система газоснабжения с позиций системного анализа

Газовый комплекс страны – сложная техническая система, состоящая из систем более низкого уровня, обеспечивающих его функционирование на различных уровнях всего технологического процесса газоснабжения (рис. 1). Система магистральных газопроводов в общем виде может быть представлена подсистемами: головные сооружения, компрессорные станции; газораспределительные станции (ГРС), подземные хранилища газа, линейные сооружения. Каждая из подсистем имеет свои конечные элементы, количество которых может измеряться десятками тысяч. Еще более сложными по количеству конечных элементов являются региональные газораспределительные системы, состоящие из трех основных подсистем: линейной части (газовая сеть); подсистемы распределения и регулирования; подсистемы хранения газа (рис. 1). Причем сразу следует отметить многоуровневость региональной системы, определяющейся входящими в нее газопроводами высокого, среднего и низкого давления, общая протяженность которых для рассматриваемой региональной системы достигает 8980 км. Подсистема распределения и регулирования объединяет газорегуляторные пункты, газорегуляторные установки, шкафные газорегуляторные пункты, домовые регуляторы. Количественные показатели структурных элементов каждой из подсистем, входящих в структуру региональной системы газоснабжения, представлены на рис. 1.

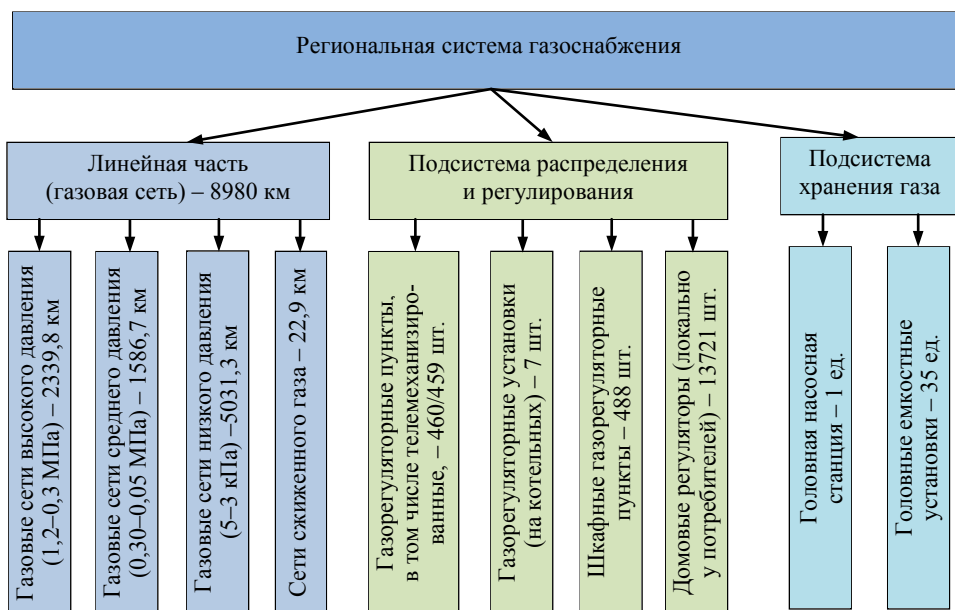


Рис. 1. Подсистемы, формирующие региональную систему газоснабжения

Fig. 1. Sub-systems forming a regional gas supply system

Анализ любой системы может быть проведен на основе ее морфологического, информационного и функционального описаний.

Морфологическое описание отражает структуру, основные элементы и связи системы и является базой для проведения последующего функционального описания (анализа). Структура, как материальное строение реальных иерархических систем, зависит от уровня и аспекта исследования системы. Л. А. Мелентьевым предложено условно различать три аспекта структур: производственную, балансовую и системную [9].

Производственная структура изучает внутренние и внешние связи в энергетике, балансовая – распределение потенциальной энергии, заключенной в подведенных энергетических ресурсах по видам энергопроизводящих и энергопотребляющих установок или по отраслям хозяйствования. Системная структура изучает энергетику как иерархию больших систем.

Применительно к задаче регионального прогнозирования расхода газа необходимо рассматривать балансовую структуру, которая позволяет представить распределение газа по конечным потребителям. Для исследуемой системы регионального газоснабжения балансовая структура может быть представлена следующими структурными элементами: энергетикой, промышленностью и сельским хозяйством, жилищно-коммунальным хозяйством (ЖКХ), населением, собственными нуждами, потерями (рис. 2). Конечное использование энергии (природного газа) – это продукция отраслей хозяйствования и оказание услуг населению.



Рис. 2. Укрупненная балансовая структура регионального потребления газа

Fig. 2. Aggregative balance structure of regional gas consumption

Следует обратить внимание, что потребление газа энергетикой – это лишь промежуточная ступень для производства и распределения преобразованных видов энергии (пар и горячая вода, электроэнергия) для четырех структурных элементов – промышленности и сельского хозяйства, ЖКХ, населения, собственных нужд.

Для описания РСГС сформирована информационная база данных, содержащая сведения показателей режимов подачи газа: суточные, месячные, квартальные, годовые объемы поставки газа по региональным элементам структуры за 2010–2015 гг. и сведения о температуре наружного воздуха. Однако требуются поиск и обоснование дополнительных факторов, которые позволят учесть индивидуальные особенности потребления газа каждым структурным элементом его балансовой структуры. Вес каждого структурного элемента в общем объеме потребления газа по региону за 2006–2015 гг. показан на рис. 3 [10]. Как видно из рис. 3, наибольший вес в структуре потребления газа занимает энергетика: от 47 до 64 % от общего потребления газа за различные годы. Причем устойчивое снижение веса энергетика начинается с 2010 г., что обусловлено, скорее всего, вводом на предприятиях собственных генерирующих мощностей. Вторым по значимости структурным элементом являются промышленность и сельское хозяйство. Доля данного структурного элемента в общем годовом объеме потребляемого газа – от 20 до 32 %. Что касается таких структурных элементов, как ЖКХ и население, то намечается тенденция к незначительному росту их доли в региональной структуре потребления газа из-за ввода жилья и газификации, их доля достигает 7 % (население) и 14 % (ЖКХ).

Интерес представляет также анализ динамики доли промышленного потребления газа в зависимости от суммарного значения в течение года (рис. 4). Начиная с 2012 г. в летний период (май – октябрь) наблюдается рост доли промышленности в общем объеме потребления – с 20 до 50 % (2013–2015 гг.). Это может быть обусловлено появлением в регионе крупного потребителя газа с технологическими нуждами.

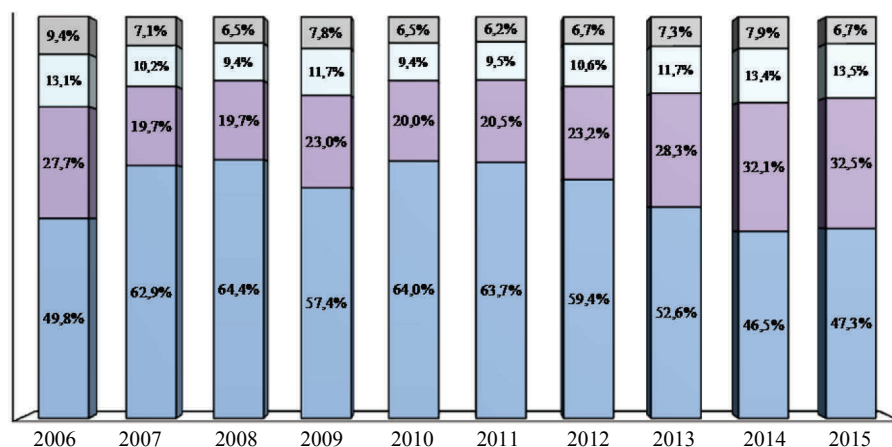


Рис. 3. Динамика региональной структуры расхода газа за 2006–2015 гг.:

- – энергетика; ■ – промышленность и сельское хозяйство; ■ – население;
- – ЖКХ, собственные нужды, потери

Fig. 3. Dynamics of regional structure of gas consumption for 2006–2015:

- – power engineering; ■ – industry and agriculture; ■ – population;
- – housing-and-communal services, own needs, losses

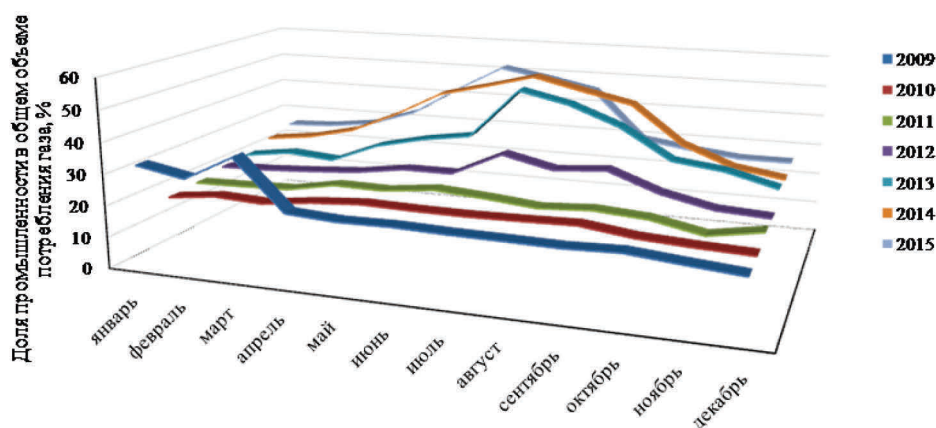


Рис. 4. Динамика доли промышленного потребления газа от суммарного значения за 2009–2015 гг.

Fig. 4. Dynamics of the share of industrial gas consumption in the total value for 2009–2015

Влияние температуры наружного воздуха на формирование режимов системы газоснабжения

Очевидно, что основной фактор, влияющий на потребление газа в регионе, – это в первую очередь температура наружного воздуха.

Парные значения коэффициента корреляции между температурой наружного воздуха и расходом газа по элементам балансовой структуры представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, по расходу газа на нужды населения и ЖКХ установлен самый высокий коэффициент корреляции

между исследуемыми признаками ($R_{t-n} = -0,98$; $R_{t-жкх} = -0,96$), отрицательное значение которого указывает, что с ростом температуры наружного воздуха потребление газа снижается, и наоборот. Полностью отсутствует связь между потерями и температурой наружного воздуха. Если посмотреть на суммарное потребление газа по региону, то связь с температурой достаточно высокая. Температура наружного воздуха является общим фактором, который должен включаться в модель для прогнозирования расхода газа на перспективу.

Таблица 1

Период, год	Коэффициент корреляции R между расходом газа за месяц $W_{\text{мес}}$ и температурой наружного воздуха T по элементам балансовой структуры						
	Суммарное потребление газа по региону	Энергетика	Население	Собственные нужды	Потери	ЖСХ	Промышленность и сельское хозяйство
2009–2015	-0,85	-0,60	-0,98	-0,85	0,17	-0,96	-0,85
2014	-0,97	-0,97	-0,99	-0,93	0,37	-0,96	-0,90
2015	-0,97	-0,98	-0,98	-0,91	0,58	-0,98	-0,86

Еще есть один важный момент: в зависимости от времени упреждения прогноза модель может трансформироваться от простейшего вида, например линейного тренда (для краткосрочного прогнозирования – от одного месяца до года), до многофакторных моделей, учитывающих как внутренние, так и внешние факторы (средне- и долгосрочные прогнозы). В соответствии с принятой классификацией оперативный прогноз имеет период упреждения до одного месяца, краткосрочный – от одного месяца до года, среднесрочный – от года до пяти лет, долгосрочный – от пяти до 15–20 лет, дальнесрочный – более этого периода. Для краткосрочного прогнозирования расхода газа упрощение вида модели становится возможным благодаря такому свойству системы, как инерционность [6].

Рассмотрим закономерности суточного формирования потребления газа в регионе в зависимости от среднесуточной температуры наружного воздуха за 2014–2015 гг.

Поле соответствия суточного потребления газа в регионе среднесуточной температуре на годовом интервале времени за 2014 и 2015 гг. представлено на рис. 5. Следует обратить внимание на четкое расслоение точек поля суточного расхода газа на две области и в 2014, и в 2015 гг. [8].

Первая область включает суточное потребление газа от 5000 до 14300 тыс. м³ (2014 г.) или от 5000 до 12000 тыс. м³ (2015 г.) и характеризуется диапазоном среднесуточной температуры наружного воздуха от плюс 13,0 до минус 17,7 °С (2014 г.) или от плюс 13 до минус 15 °С (2015 г.). Это область работы системы отопления. Вторая область включает суточное потребление газа до 5000 тыс. м³ и характеризуется положительным диапазоном среднесуточной температуры наружного воздуха (от 5 до 27 °С). Назовем ее областью положительных температур.

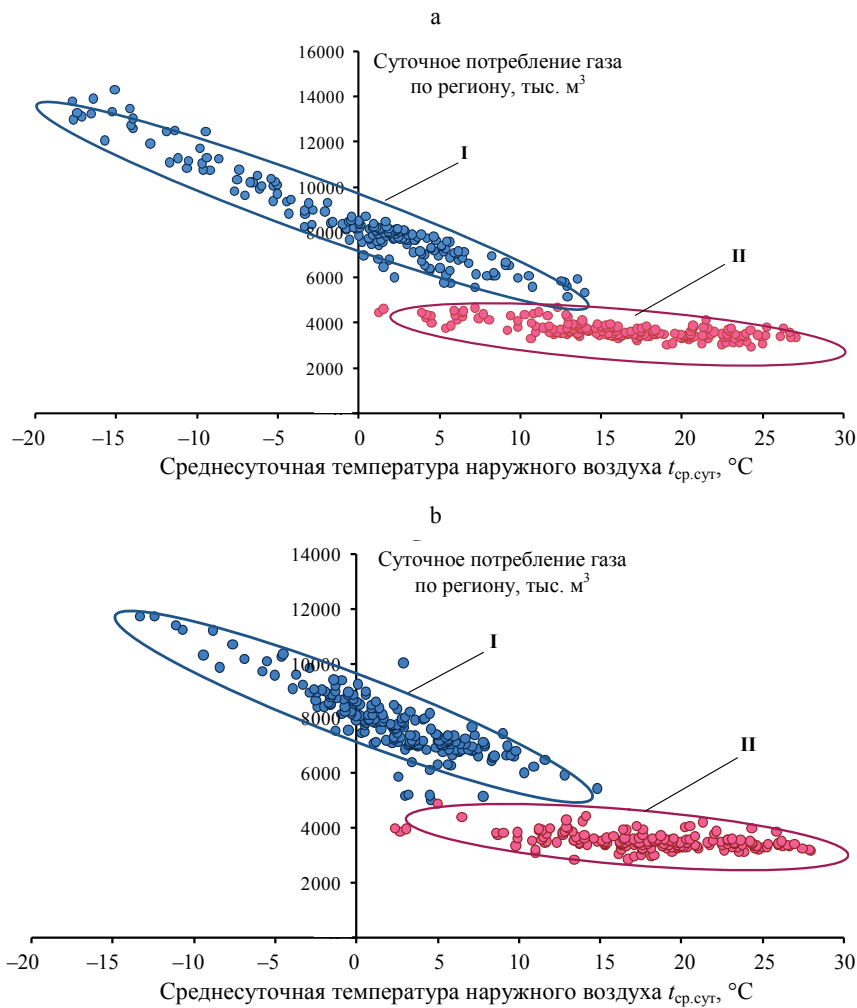


Рис. 5. Поле соответствия суточного потребления газа в регионе среднесуточной температуре на годовом интервале времени за 2014 г. (а) и 2015 г. (б):
I – область работы системы отопления; II – область положительных температур (система отопления отключена)

Fig. 5. The field of correspondence of daily gas consumption in the region to the average daily temperature in the annual time interval for 2014 (a) and 2015 (b):
I – heating system functioning area; II – positive temperatures area (the heating system is off)

Во второй области суточный расход газа изменяется незначительно на всем диапазоне температуры, а если учесть, что на данном диапазоне температур отсутствует отопительная составляющая расхода газа, то можно с уверенностью сказать, что этот расход формируют промышленные потребители (технологический расход газа) и нужды горячего водоснабжения (в меньшей степени). Для первой области следует отметить обратно пропорциональный температуре рост потребления газа. Причем первая область располагается в поле как положительных, так и отрицательных среднесуточных температур, поскольку отопление включается, если в течение

пяти дней подряд среднесуточная температура была ниже 8 °С. Наибольшая плотность точек потребления газа в первой области находится в температурном диапазоне от минус 5 до плюс 8 °С. Фактически потребление газа в первой области представляет собой его сумму на технологию, отопление, горячее водоснабжение. Таким образом, появление излома в поле суточного потребления газа в диапазоне температур от 0 до 10 °С связано с появлением отопительной составляющей. Диапазон температур от 0 до 10 °С соответствует зоне неопределенного состояния газоснабжающей системы, что является одним из признаков сложной технической системы. Соответственно, любые попытки описать суточное потребление газа лишь одним уравнением на всем диапазоне температур не позволят прогнозировать потребление газа с погрешностью до 5 %.

Однофакторные уравнения зависимости потребления газа от температуры по двум основным областям представлены в табл. 2. Сравним полученные зависимости суточного потребления газа от температуры для первой и второй областей (табл. 2).

Таблица 2

Год	Область работы системы отопления (от плюс 13 до минус 17,7 °С)	Область положительных температур (система отопления отключена) (от 5 до 27 °С)
2014	$W_{\text{газ}} = -276,1t_{\text{ср.сут}} + 8421$ тыс. м ³ , $R^2 = 0,925$	$W_{\text{газ}} = -45,17t_{\text{ср.сут}} + 4431$ тыс. м ³ , $R^2 = 0,497$
2015	$W_{\text{газ}} = -232,1t_{\text{ср.сут}} + 8326$ тыс. м ³ , $R^2 = 0,749$	$W_{\text{газ}} = -25,35t_{\text{ср.сут}} + 4011$ тыс. м ³ , $R^2 = 0,192$

В области положительных температур (система отопления отключена) изменение температуры на 1 °С приводит к изменению среднесуточного расхода газа на 68,1 тыс. м³ в 2014 г. и на 79,8 тыс. м³ в 2015 г. (табл. 3). В то же время для области работы системы отопления потребление газа увеличивается при снижении температуры на 1 °С до 406,6 тыс. м³ в 2014 г. и до 238,3 тыс. м³ в 2015 г. Такая разница в чувствительности расхода газа в 2014 г. объясняется более холодной зимой. В летний период потребление газа формируют бытовые потребители (газовые плиты), технологические нужды производств, а также технологические сельскохозяйственные установки (зерносушилки, заготовка кормов).

В области работы системы отопления увеличивается не только «крутизна» характеристики, но и ее смещение относительно суточного потребления области положительных температур. Практически в два раза повышается свободный член в уравнении потребления газа. Он составляет 8400 против 4400 тыс. м³ для области положительных температур. Оценка линейных коэффициентов эластичности моделей показала, что для модели области системы отопления в 2014 г. в среднем увеличение температуры на 1 % приводит к уменьшению расхода газа на 0,22 %, а для области положительных температур – на 0,07 %.

Совмещение областей работы системы отопления за 2014–2015 гг. (без учета суток неопределенного состояния системы) представлено на рис. 6.

Таблица 3

Область, период	Изменение среднесуточной температуры $\Delta t_{\text{ср.сут}}$, °C, в периоде	Среднесуточный расход газа в области, тыс. м ³		Изменение суточного расхода газа $\Delta W = W_{\text{max}} - W_{\text{min}}$, тыс. м ³	Изменение расхода газа, тыс. м ³ , при изменении температуры на 1 °C
		W_{max}	W_{min}		
Область работы системы отопления, 2014 г.	18,0	14304,7	6986,7	7318,0	406,6
Область положительных температур (система отопления отключена), 2014 г.	26,0	4718,3	2948,7	1769,6	68,1
Область работы системы отопления, 2015 г.	28,1	11707,6	5012,4	6695,2	238,3
Область положительных температур (система отопления отключена), 2015 г.	25,3	4898,5	2880,8	2017,7	79,8

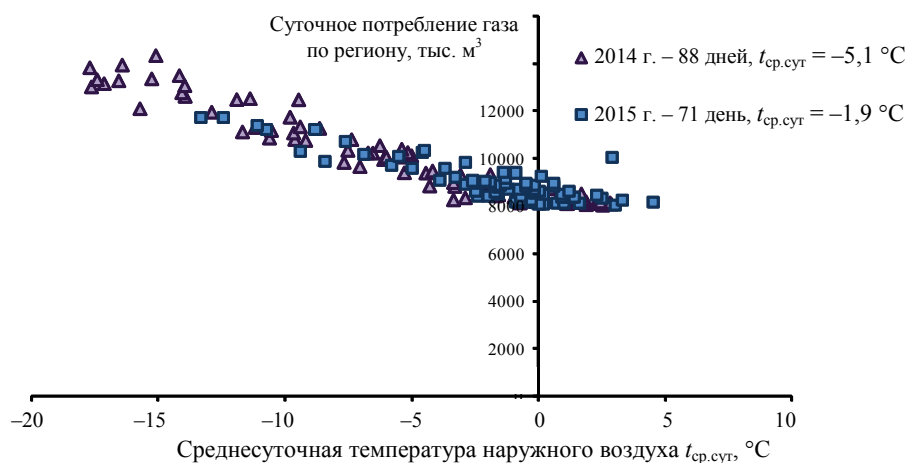


Рис. 6. Совмещение областей работы системы отопления (без учета суток неопределенного состояния региональной системы газоснабжения)

Fig. 6. Combining the areas of the heating system functioning (disregarding the time of day of the uncertain state of the regional gas supply system)

Как видно из рис. 6, область работы системы отопления более вытянута в 2014 г. в сторону низкой ($-17,7$ °C) среднесуточной температуры и объединяет 88 дней. В 2015 г. область работы системы отопления не доходит до -15 °C, а основное скопление точек ограничивается диапазоном от -5 до $+5$ °C и объединяет 71 день (более теплая зима).

Совмещение областей положительных среднесуточных температур (без учета суток неопределенного состояния РСГС) представлено на рис. 7.

Как видно из рис. 7, при одинаковом количестве дней $n = 156$ среднесуточная температура выборки в 2015 г. оказалась незначительно выше, чем в 2014 г., и составила $18,3$ °C. Но если в 2014 г. значение свободного члена в уравнении расхода газа было 4431 тыс. м³, то в 2015-м оно составило 4011 тыс. м³, что может быть обусловлено только экономическими факторами.



Рис. 7. Совмещение областей положительных среднесуточных температур (без учета суток неопределенного состояния региональной системы газоснабжения)

Fig. 7. Combining the positive daily temperature areas (disregarding the day of the uncertain state of the regional gas supply system)

ВЫВОДЫ

1. Региональная система газоснабжения рассмотрена как многоуровневая сложная технологическая система, объединяющая три подсистемы: линейную часть, распределение и регулирование, хранение газа.

2. Сформирована балансовая структура региональной системы газоснабжения (по потреблению газа) и показаны общие закономерности ее формирования, включая отдельные входящие в ее состав структурные элементы: промышленность и сельское хозяйство, жилищно-коммунальное хозяйство, население, собственные нужды.

3. На основе сформированной базы данных, содержащей сведения по показателям режимов подачи газа (суточные, месячные, квартальные, годовые) по элементам балансовой структуры региональной системы газоснабжения за 2010–2015 гг. и сведения о температуре наружного воздуха, проведены исследования влияния среднесуточной температуры на потребление газа в регионе.

4. Предложено на поле соответствия суточного потребления газа среднесуточной температуре на годовом интервале времени выделить две основные области: работы системы отопления и положительных среднесуточных температур (система отопления отключена). Эти области имеют различные законы изменения суточного потребления газа и частично перекрываются в диапазоне температур от 0 до 10 °C (зона неопределенного состояния региональной системы газоснабжения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных направлений СЭИ – ИСЭМ / ред. Н. И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2010. 686 с.
2. Илькевич, Н. И. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения / Н. И. Илькевич, Т. В. Дзюбина, Ж. В. Калинина. Новосибирск: Наука, 2014. 217 с.
3. Моделирование равновесия потоков стоимости спроса и предложения на природный газ / Н. И. Илькевич [и др.] // Трубопроводные системы энергетики: методические и прикладные проблемы математического моделирования. Новосибирск: Наука, 2015. С. 318–331.

4. Шевченко, М. В. Разработка частных моделей организации мониторинга системы регионального газоснабжения / М. В. Шевченко // Технологический аудит и резервы производства. 2015. Т. 6, № 2 (26). С. 40–46.
5. Галустов, Г. Г. Математическое моделирование и прогнозирование в технических системах / Г. Г. Галустов, С. П. Бровченко, С. Н. Мелешкин. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. 30 с.
6. Перегудов, Ф. И. Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. М.: Высш. шк., 1989. 367 с.
7. Прогноз потребления газа – основа принятия рациональных решений по структуре и технологическим параметрам при проектировании и реконструкции системы газоснабжения / Р. А. Кантиюков [и др.] // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 1. С. 201–221. Режим доступа: http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p201-221_KantyukovRA_ru.pdf.
8. Грунтович, Н. В. О необходимости изучения структуры и закономерностей функционирования региональных систем газоснабжения / Н. В. Грунтович, Д. Р. Мороз, В. Е. Шалоник // Энергетическая стратегия. 2017. № 1. С. 42–46.
9. Мелентьев, Л. А. Избранные труды. Методология системных исследований в энергетике / Л. А. Мелентьев. М.: Наука, 1995. 289 с.
10. Мороз, Д. Р. Разработка моделей потребления газа по структурным элементам региональной системы газоснабжения / Д. Р. Мороз, А. А. Капанский // Энергосбережение и эффективность в технических системах: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. студ., молод. ученых и спец. Тамбов: Тамбов. госуд. техн. ун-т, 2017. С. 416–418.

Поступила 19.02.2018 Подписана в печать 26.03.2018 Опубликовано онлайн 27.07.2018

REFERENCES

1. Voropay N. I. (ed.) (2010) *System Research in the Energy Sector: Retrospective of Scientific Directions of the SEI – MESI*. Novosibirsk, Nauka Publ. 686 (in Russian).
2. Ilkevich N., Dzyubina T., Kalinina Zh. (2014) *Multilevel Modeling of the Development of Gas Supply Systems*. Novosibirsk, Nauka Publ. 217 (in Russian).
3. Ilkevich N., Dzyubina T., Kalinina Zh., Okuneva S. (2015) Simulation of the Equilibrium of the Flows of the Cost of Supply and Demand on Natural Gas. *Pipeline Systems of Power Engineering: Methodical and Applied Problems of Mathematical Modeling*. Novosibirsk, Nauka Publ., 318–331 (in Russian).
4. Shevchenko M. (2015) Development of Specific Models for Monitoring the Regional Gas Supply System. *Tekhnologicheskii Audit i Rezervy Proizvodstva = Technology Audit and Production Reserves*, 6 (2), 40–46 (in Russian).
5. Galustov G., Brovchenko S., Meleshkin S. (2008) *Mathematical Modeling and Forecasting in Technical Systems: Educational*. Taganrog, Publishing house Taganrog Technological Institute of Southern Federal University. 30 (in Russian).
6. Peregudov F., Tarasenko F. (1989) *Introduction to System Analysis*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 367. (in Russian).
7. Kantyukov R., Sukharev M., Meshalkin V., Gimranov R., Popov A., Ryzhenkov I. (2015) Forecast Gas Consumption – the Basis for Making Rational Decisions on the Structure and Technological Parameters in the Design and Reconstruction of the Gas Supply System. *Neftegazovoe Delo = Oil and Gas Business*, (1). 201–221. Available at: http://ogbus.ru/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p201-221_KantyukovRA_ru.pdf (in Russian).
8. Gruntovich N., Moroz D., Shalonic V. (2017) About Necessity of Study the Structure and Regularities of the Functioning of Regional Gas Supply Systems. *Energeticheskaya Strategiya = Energy Strategy*, (1) 42–46 (in Russian).
9. Melentiev L. (1995) *Selected Works. Methodology of System Researches in Power Engineering*. Moscow, Nauka Publ. 289 (in Russian).
10. Moroz D., Kapanskii A. (2017) Development of Models of Gas Consumption by Structural Elements of the Regional Gas Supply System Energy Saving and Efficiency in Technical Systems. *Energoberezhnie i Effektivnost' v Tekhnicheskikh Sistemakh: Materialy IV Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Stud., Molod. Uchenykh i Spets.* [Materials of the IV International Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists]. Tambov, Tambov State Technical University, 416–418 (in Russian).

Received: 19 February 2018

Accepted: 26 March 2018

Published online: 27 July 2018