

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОЙ ЗАГРУЗКИ
ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ
СЕТЕЙ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

А. Н. Пахомов¹, Н. Ц. Гатапова¹, В. В. Киладзе², А. Ю. Орлов³

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), kvidep@tstu.ru, Тамбов, Россия;
кафедра нефтегазового дела и нефтехимии,*

*ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет (2), Владивосток, Россия;
АО «Газпром газораспределение Тамбов» (3), Тамбов, Россия*

Ключевые слова: аварийность; моделирование; неравномерность расхода; потребление газа; прогнозирование; регулирование; теория клеточных автоматов.

Аннотация: Предложено применение математических методов теории клеточных автоматов для моделирования часовой и суточной неравномерности потребления газа. Моделирование потребления газа заданным объектом позволяет рассчитать общие, среднесуточные и среднечасовые расходы газа, определить коэффициенты неравномерности потребления газа, а также временные периоды минимального и максимального потребления газа в течение суток, на основе которых разработаны рекомендации по регулированию неравномерности загрузки трубопроводных систем, прогнозированию и предупреждению возникновения аварийных ситуаций.

Введение

подавляющее большинство промышленных, бытовых, социокультурных и других объектов характеризуются неравномерностью потребления природного газа. В зависимости от типа объекта потребление газа изменяется в определенном временном интервале. Соответственно, неравномерность потребления газа классифицируют (в зависимости от учитываемого временного интервала) как сезонную, суточную и часовую. В общем случае расход газа в определенный временной интервал зависит от так называемых категорий потребителей и их вклада в общий объем потребления в заданный период времени. Неравномерность потребления газа зависит от образа жизни населения в данной местности (если рассматривается объект, на котором преимущественно потребляется газ для бытовых целей), дня недели (рабочий, выходной, предпраздничный или праздничный), типа и режима работы промышленных предприятий, подключенных к устройству учета (количество, тип и состояние функционирующего газового оборудования) и климатических условий [1]. В зависимости от представленных факторов, как правило, суточный график потребления характеризуется наличием определенных периодов экстремального (максимального и минимального) газопотребления. Определение таких периодов – важная задача для управления системой газораспределения и предупреждения возможных аварийных ситуаций.

Расчет газовой сети должен быть проведен исходя из знания максимального часового расхода для заданного потребителя или группы потребителей. Однако подобные данные о часовых колебаниях потребления газа определенной категорией потребителей, как правило, трудно обобщить в виде функциональных зависимостей, так как они фактически имеют случайный характер [1]. Поэтому разработка модели потребления газа, основанная на случайном характере включения потребителей, с учетом накопленных статистических зависимостей по поведению определенных групп потребителей, является актуальной задачей.

Для решения этой задачи предлагается использовать положения теории клеточных автоматов с учетом статистически накопленных данных о поведении определенной группы потребителей (отдельного промышленного объекта, нескольких отдельных газовых приборов, сети гражданских потребителей) [2]. Достоинство применения математического аппарата клеточных автоматов – возможность разбиения объекта на отдельные элементы по физическому принципу или идеологии потребления и учета различных стратегий поведения объекта в течение заданного интервала времени (минуты, часы, сутки, недели и т.п.) [3].

Теоретические положения

В первом приближении рассмотрим поведение выборки из 1000 мелких потребителей газа (городская квартира), разбитых на три социальные группы (по статистическим данным) в период пяти рабочих суток (условно с понедельника по пятницу) [4].

Для моделирования потребления газа на выбранном объекте предложены следующие правила.

1. В соответствии со статистическими данными по социальным группам потребителей в модели выделены три группы: 1) активно использующие газовые приборы до начала рабочего дня, частично в обеденный перерыв и по окончании рабочего дня; 2) случайным образом использующие газовые приборы в течение дня, а также активно использующие газовые приборы в утренние и вечерние часы; 3) использующие газовые приборы в основном в обеденный перерыв.

2. В начальный момент времени число потребителей распределяется случайным образом, но в заданных, исходя из статистических данных переписи населения, долях.

3. Начальный момент времени для моделирования 0 часов 0 минут.

4. Шаг по времени устанавливается 15 минут, ориентируясь на среднестатистическое время использования одного газового прибора.

5. Включение и выключение газового прибора конкретным потребителем происходит случайным образом, но с разной вероятностью включения. Вероятность включения зависит от группы, к которой отнесен потребитель при начальном распределении пользователей по выборке.

6. Моделирование осуществляется до момента окончания пятых рабочих суток, соответствующих окончанию рабочей недели.

В результате, для каждого потребителя накапливаются данные по 15-минутному потреблению в течение каждых суток, которые в дальнейшем используются для расчета часового и суточного потребления газа объектом в целом и отдельными потребителями в частности, расчета коэффициента часовой и суточной неравномерности газопотребления.

Результаты моделирования, обсуждение

В таблице 1 приведены данные, полученные при моделировании часовой неравномерности потребления газа в течение пяти рабочих суток по предлагаемой модели функционирования выбранного объекта (k – коэффициент неравномерности газопотребления).

Таблица 1

**Неравномерность потребления газа по часам
в течение пяти рабочих суток**

Время, ч	Сутки									
	1		2		3		4		5	
	Расход, м ³ /ч	<i>k</i>	Расход, м ³ /ч	<i>k</i>	Расход, м ³ /ч	<i>k</i>	Расход, м ³ /ч	<i>k</i>	Расход, м ³ /ч	<i>k</i>
1:00	228	0,268	247	0,290	252	0,298	250	0,295	245	0,290
2:00	231	0,271	226	0,265	217	0,257	238	0,281	216	0,255
3:00	211	0,248	228	0,267	212	0,251	223	0,263	216	0,255
4:00	202	0,237	245	0,287	216	0,255	215	0,254	232	0,274
5:00	224	0,263	205	0,240	234	0,277	225	0,265	207	0,245
6:00	604	0,710	611	0,717	628	0,743	624	0,736	595	0,704
7:00	1809	2,126	1802	2,113	1831	2,166	1821	2,147	1823	2,156
8:00	1835	2,156	1832	2,148	1806	2,136	1830	2,158	1813	2,144
9:00	1533	1,801	1532	1,797	1528	1,807	1520	1,792	1526	1,804
10:00	614	0,721	607	0,712	590	0,698	619	0,730	609	0,720
11:00	643	0,756	637	0,747	610	0,722	637	0,751	627	0,741
12:00	653	0,767	630	0,739	603	0,713	582	0,686	601	0,711
13:00	782	0,919	776	0,910	741	0,876	784	0,925	818	0,967
14:00	1187	1,395	1171	1,373	1207	1,428	1184	1,396	1194	1,412
15:00	1006	1,182	1007	1,181	971	1,148	998	1,177	993	1,174
16:00	445	0,523	438	0,514	415	0,491	409	0,482	397	0,469
17:00	425	0,499	422	0,495	427	0,505	405	0,478	431	0,510
18:00	773	0,908	770	0,903	787	0,931	783	0,923	732	0,866
19:00	1837	2,158	1816	2,130	1799	2,128	1814	2,139	1823	2,156
20:00	1798	2,113	1830	2,146	1839	2,175	1833	2,162	1805	2,134
21:00	1514	1,779	1510	1,771	1546	1,829	1521	1,794	1510	1,786
22:00	620	0,728	647	0,759	643	0,761	636	0,750	618	0,731
23:00	638	0,750	665	0,780	576	0,681	600	0,708	619	0,732
24:00	614	0,721	611	0,717	613	0,725	601	0,709	646	0,764

На рисунках 1, 2 приведены графики усредненного часового потребления газа G в рабочие сутки и полученные значения коэффициента часовой неравномерности потребления газа k , усредненные по величинам среднесуточного потребления газа в рассматриваемый пятисуточный период.

Исходя из данных табл. 1 и рис. 2, можно сделать вывод о значительной неравномерности потребления газа на заданном объекте. Минимальное значение коэффициента неравномерности наблюдалось в периоды минимального газопотребления и в среднем составило примерно 0,3, что значительно ниже обычно наблюдаемых величин коэффициента неравномерности для группы мелких потребителей.

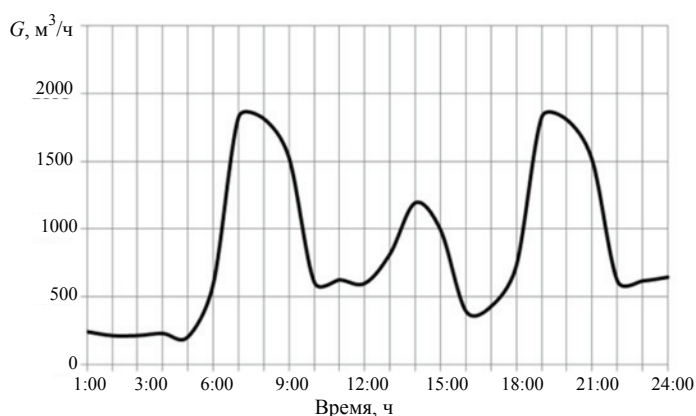


Рис. 1. График усредненного часового потребления газа

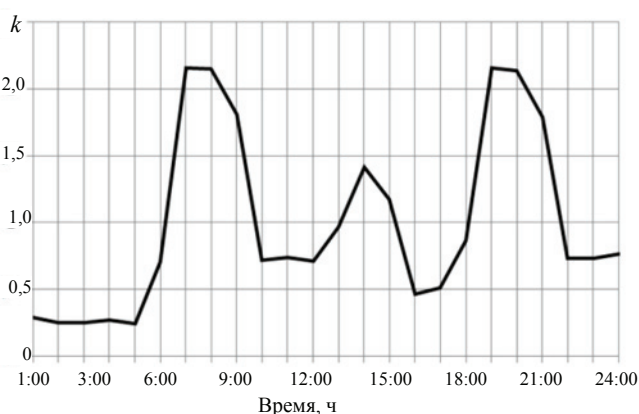


Рис. 2. График усредненного значения коэффициента часовой неравномерности потребления газа

Максимальное значение коэффициента неравномерности наблюдалось в периоды максимального газопотребления и в среднем составило примерно 2,2, что соответствует регистрируемым максимальным значениям коэффициента неравномерности для подобных объектов. Соответственно, для уточнения модели газопотребления, необходимо проанализировать характер поведения потребителей в периоды минимального газопотребления.

Важное значение для расчета возможности расширения существующей системы газораспределения имеют величины суммарного и среднечасового расхода потребляемого газа [1]. В таблице 2 приведен расчет значения суммарного и среднечасового расхода газа по рассматриваемому периоду (пять рабочих суток). Очевидно, что суммарный и среднечасовой расходы газа в конкретные сутки мало отличаются от среднего значения расхода газа в течение рабочей недели (средний суточный расход газа в рабочую неделю составил $20\,366\text{ м}^3$, средний среднечасовой расход газа в сутки в рабочую неделю составил $848,58\text{ м}^3/\text{ч}$), что хорошо согласуется с результатами замеров на газорегуляторном пункте.

Для прогнозирования возможных аварийных ситуаций и анализа возможности регулирования неравномерности потребления газа в определенные моменты времени необходим расчет максимума и минимума потребления газа в сутки и по часам [1]. В таблице 3 приведены данные по величинам суточных максимумов и минимумов потребления газа на моделируемом объекте с указанием времени, когда данные экстремумы наблюдались.

Таблица 2

Суммарный и среднечасовой расход газа по пяти рабочим суткам

Сутки	Суммарный суточный расход газа, м ³	Среднечасовой расход газа, м ³ /ч
1	20 426	851,083
2	20 465	852,708
3	20 291	845,458
4	20 352	848,000
5	20 296	845,667

Таблица 3

Сводная таблица неравномерности потребления газа по суточным максимумам и минимумам в течение пяти рабочих суток

Сутки	Максимум потребления		Минимум потребления	
	Расход, м ³ /ч	Время	Расход, м ³ /ч	Время
1	467	8:30	43	0:30
2	465	19:30	46	5:30
3	470	18:00	46	3:15
4	466	19:30	44	3:45
5	463	18:30	42	3:00

В результате анализа данных, полученных при моделировании, определены четыре локальных минимума потребления газа. Как показывают результаты анализа графиков газопотребления за пять рабочих суток, первый локальный минимум наблюдается в период с 0:00 до 6:00, второй – с 9:00 до 13:00, третий – с 15:00 до 18:00, четвертый – с 21:00 до 24:00.

В таблице 4 приведены результаты анализа локальных минимумов потребления газа в течение рабочих пяти суток с указанием объема и времени наблюдения локального минимума потребления газа в рассматриваемый период.

Отдельный интерес представляет возможность более подробного анализа данных по потреблению газа в периоды отмеченных локальных минимумов. На рисунках 3, а – г представлены графики потребления газа на моделируемом объекте в периоды соответственно первого, второго, третьего и четвертого локальных минимумов потребления.

Исходя из анализа данных, представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что предлагаемая модель неравномерности потребления газа учитывает характерные часовые особенности потребления газа, что отражается на разном характере кривых газопотребления в выбранном временном диапазоне, соответствующем определенному локальному минимуму потребления газа.

Аналогично локальным минимумам потребления газа (важным для анализа возможности регулирования неравномерности потребления газа, например, для создания резервов газа или задействования потребителей-регуляторов) представляет интерес анализ данных по потреблению газа в периоды локальных максимумов. Анализ характера неравномерности потребления газа в период локальных максимумов важен для возможности прогнозирования и предупреждения возникновения аварийных ситуаций в моделируемом объекте.

Таблица 4

**Сводная таблица неравномерности потребления газа
по локальным минимумам в течение пяти рабочих суток**

Сутки	Первый локальный минимум		Второй локальный минимум		Третий локальный минимум		Четвертый локальный минимум	
	Расход, м ³ /ч	Время	Расход, м ³ /ч	Время	Расход, м ³ /ч	Время	Расход, м ³ /ч	Время
1	43	0:30	146	12:30	93	16:15	146	21:45
2	46	5:30	146	9:45	90	16:30	142	21:00
3	46	3:15	135	10:00	98	15:30	126	22:45
4	44	3:45	139	11:45	87	16:15	143	22:15
5	42	3:00	135	11:15	90	17:15	145	23:00

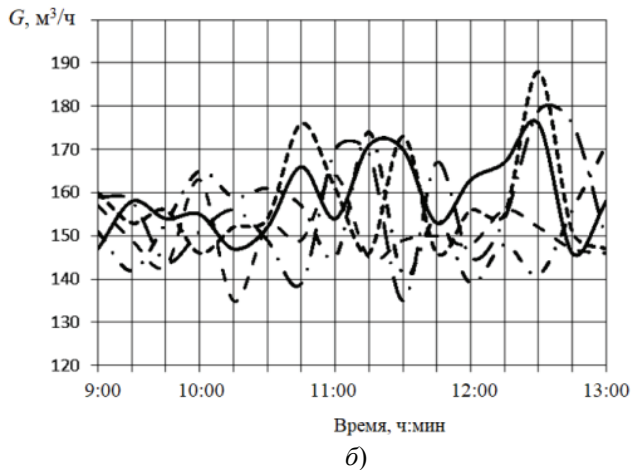
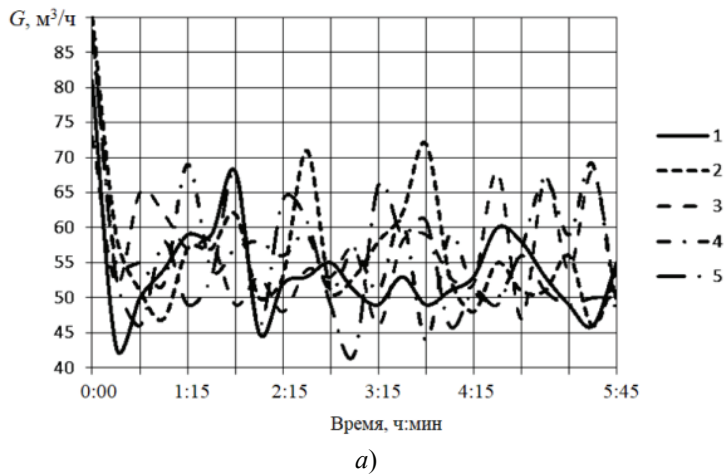
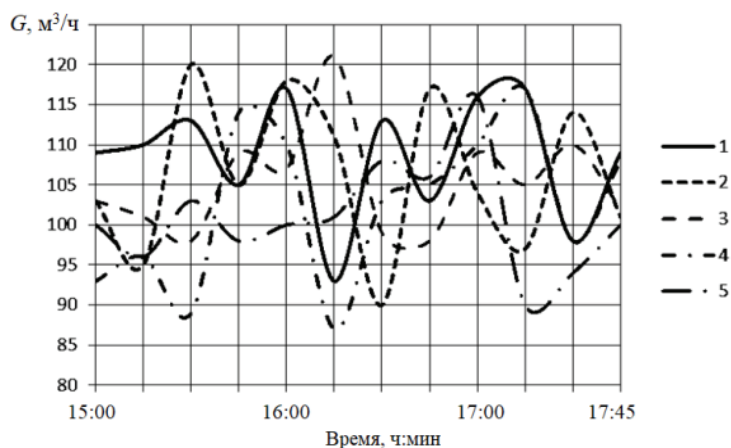
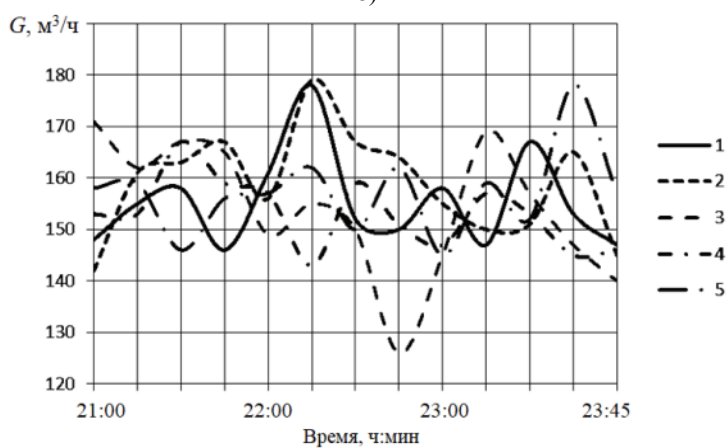


Рис. 3. Графики неравномерности потребления газа в периоды локальных минимумов потребления (начало):
а – первого (примерно с 0:00 до 6:00); *б* – второго (примерно с 9:00 до 13:00)



а)



б)

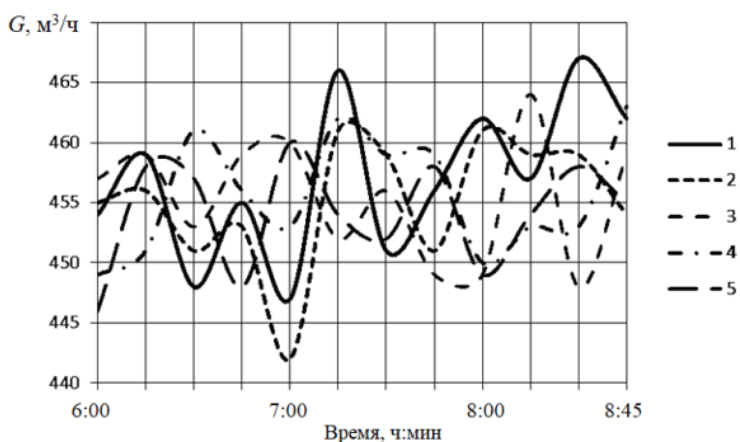
Рис. 3. Окончание:

а – третьего (примерно с 15:00 до 18:00); б – четвертого (примерно с 21:00 до 24:00)
(номер кривой соответствует суткам наблюдений (с 1 по 5 сутки))

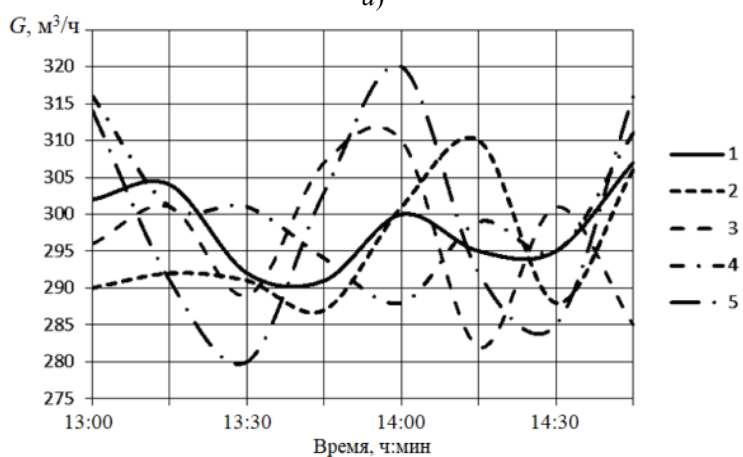
Таблица 5

Сводная таблица неравномерности потребления газа по локальным максимумам в течение пяти рабочих суток

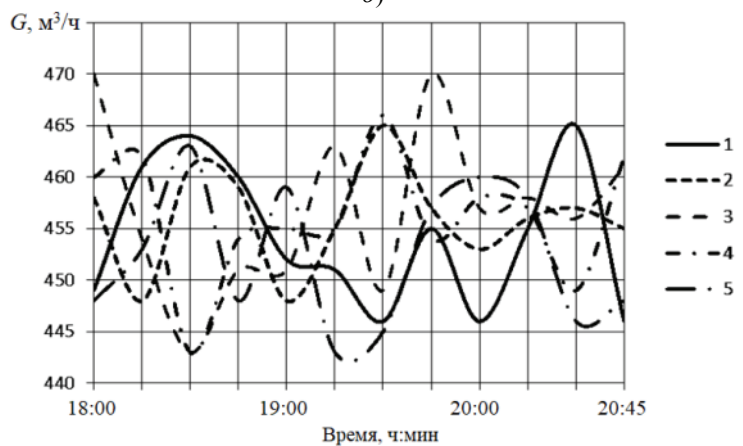
Сутки	Первый локальный максимум		Второй локальный максимум		Третий локальный максимум	
	Расход, м³/ч	Время	Расход, м³/ч	Время	Расход, м³/ч	Время
1	467	8:30	307	14:45	465	20:30
2	461	7:15	310	14:15	465	19:30
3	464	8:15	310	14:00	470	18:00
4	463	8:45	316	13:00	466	19:30
5	460	7:00	320	14:00	463	18:30



a)



b)



v)

Рис. 4. Графики неравномерности потребления газа в периоды локальных максимумов потребления:
a – первого (примерно с 6:00 до 9:00); *б* – второго (примерно с 13:00 до 15:00);
в – третьего (примерно с 18:00 до 21:00)
 (номер кривой соответствует суткам наблюдений (с 1 по 5 сутки))

В результате анализа данных, полученных при моделировании, определены три локальных максимума потребления газа. Установлено, что в рабочие сутки первый локальный максимум наблюдается в период с 6:00 до 9:00, второй – с 13:00 до 15:00, третий – с 18:00 до 21:00. В таблице 5 приведены результаты анализа локальных максимумов потребления газа в рассматриваемый пятисуточный период с указанием объема и времени наблюдения локального максимума газопотребления в течение рабочих суток.

На рисунках 4, *a – в* представлены графики потребления газа на моделируемом объекте в период соответственно первого, второго и третьего локальных максимумов.

Так же как и для локальных минимумов, исходя из анализа данных, представленных на рис. 4, можно сделать вывод, что предлагаемая модель неравномерности потребления газа учитывает часовые особенности потребления газа потребителями, что отражается на разном характере кривых газопотребления в выбранном временном диапазоне, соответствующем определенному локальному максимуму газопотребления.

Заключение

Таким образом, предложенная модель потребления газа заданным потребителем, основанная на применении клеточных автоматов с заданным статистическим распределением пользователей и правилами поведения конкретного пользователя в течение определенного периода времени, позволяет моделировать часовую и суточную неравномерность потребления газа, на основании чего возможна выработка рекомендаций по регулированию неравномерности газопотребления в периоды минимального потребления газа, а также появляется возможность прогнозирования возникновения аварийных ситуаций в периоды максимального потребления газа.

Список литературы

1. Брюханов, О. Н. Основы эксплуатации оборудования и систем газоснабжения / О. Н. Брюханов. – М. : ИНФРА-М, 2005. – 256 с.
2. Матюшкин, И. В. Обзор по тематике клеточных автоматов на базе современных отечественных публикаций / И. В. Матюшкин, М. А. Заплетина // Компьютерные исследования и моделирование. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 9 – 57.
3. Пахомов, А. Н. Возможности самоорганизации дисперсных систем при сушке на подложке / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, Е. А. Ильин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 633 – 637.
4. Пахомов, А. Н. Применение клеточных автоматов при моделировании процесса ультрафиолетового обеззараживания воды / А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 255 – 262. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.255-262

Simulation of Uneven Loading of Pipeline Systems through the Example of Gas Distribution Networks

A. N. Pakhomov¹, N. Ts. Gatapova¹, V. V. Kiladze², A. Yu. Orlov³

*Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety, TSTU (1),
kvidep@tstu.ru, Tambov, Russia;
Department of Oil and Gas Business and Petrochemistry,
Far Eastern Federal University (2), Vladivostok, Russia;
JSC Gazprom Gas Distribution Tambov (3), Tambov, Russia*

Keywords: accident rate; modeling; uneven consumption; gas consumption; forecasting; regulation; theory of cellular automata.

Abstract: The application of mathematical methods of the theory of cellular automata for modeling the hourly and daily unevenness of gas consumption is proposed. Simulation of gas consumption by a given facility enables to calculate the total, average daily and average hourly gas consumption, determine the coefficients of uneven gas consumption, as well as the time periods of minimum and maximum gas consumption during the day, on the basis of which recommendations have been developed for regulating the uneven loading of pipeline systems, forecasting and prevention of emergencies.

References

1. Bryukhanov O.N. *Osnovy ekspluatatsii oborudovaniya i sistem gazosnabzheniya* [Fundamentals of operation of equipment and gas supply systems], Moscow: INFRA-M, 2005, 256 p. (In Russ.).
2. Matyushkin I.V., Zapletina M.A. [A review on the subject of cellular automata based on modern domestic publications], *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling], 2019, vol. 11, no.1, pp. 9-57. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V., Il'in Ye. A. [Possibilities of self-organization of dispersed systems during drying on a substrate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no 3, pp. 633-637. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts., Pakhomova Yu.V. [The use of cellular automata in modeling the process of ultraviolet water disinfection], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 255-262. doi: 10.17277/vestnik.2021.02. pp.255-262 (In Russ., abstract in Eng.)

Modellierung der ungleichmäßigen Belastung von Rohrleitungssystemen am Beispiel der Gasverteilungsnetze

Zusammenfassung: Es ist die Anwendung mathematischer Methoden der Theorie zellulärer Automaten zur Modellierung der stündlichen und täglichen Ungleichmäßigkeit des Gasverbrauchs vorgeschlagen. Die Modellierung des Gasverbrauchs einer bestimmten Anlage ermöglicht die Berechnung des gesamten, durchschnittlichen täglichen und durchschnittlichen stündlichen Gasverbrauchs, die Bestimmung der Koeffizienten des ungleichmäßigen Gasverbrauchs sowie der Zeiträume des minimalen und maximalen Gasverbrauchs während des Tages, auf deren Grundlage Empfehlungen zur Regulierung der ungleichmäßigen Belastung von Rohrleitungssystemen, Prognose und Vermeidung von Notsituationen entwickelt worden sind.

Simulation d'un chargement inégal des systèmes de tuyauterie à l'exemple des réseaux de distribution

Résumé: Est proposé d'utiliser des méthodes mathématiques de la théorie des automates cellulaires pour modéliser l'irrégularité de la consommation de gaz horaire et quotidienne. La modélisation de la consommation de gaz par un objet donné permet de calculer la consommation totale, moyenne quotidienne et moyenne horaire de gaz, ainsi que de déterminer les coefficients d'irrégularité de la consommation de gaz et les périodes de consommation minimale et maximale de gaz au cours de la journée, à la base desquelles sont élaborées des recommandations pour la gestion de l'irrégularité du chargement des systèmes de tuyauterie, la prévision et la prévention des situations d'urgence.

Авторы: *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Киладзе Виктория Васильевна* – магистрант, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия; *Орлов Андрей Юрьевич* – кандидат технических наук, заместитель главного инженера, АО «Газпром газораспределение Тамбов», Тамбов, Россия.
