

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СЕТИ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ПЕРКОЛЯЦИИ

Ю. В. Пахомова<sup>1</sup>, В. В. Киладзе<sup>2</sup>, Н. Ц. Гатапова<sup>1</sup>, А. Ю. Орлов<sup>3</sup>

*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:** газопотребление; газоснабжение; затраты; оптимизация; перколяция; прогнозирование; развитие; регулирование; территория.

**Аннотация:** Предложено применение положений теории перколяции к моделированию развития сети газоснабжения в определенном географическом районе, характеризующемся прогнозируемым количеством объектов, требующих газификации. Моделирование сети газоснабжения на различных перколяционных решетках позволяет определить оптимальную площадь района газификации, при которой удельные расходы на прокладку газопровода будут минимальны. Представлены результаты моделирования на малых и больших перколяционных решетках с произвольным распределением заданного количества объектов, требующих газификации.

---

### Введение

На сегодняшний день одним из важнейших вопросов развития газовой отрасли РФ является решение задачи газификации новых территорий (городских, сельских, обособленных и интегрированных в городскую среду промышленных предприятий). Эти территории характеризуются неоднородностью распределения потребителей газа, как по географическому признаку, так и планируемым объемам газопотребления [1, 2]. При этом развитие сети газоснабжения должно удовлетворять требованиям формирования комфортной среды жизнедеятельности, что накладывает определенные ограничения на решения по прокладке сетей газоснабжения новых потребителей. В этих условиях является актуальной задача моделирования сети газоснабжения в целях прогнозирования удельных затрат на газификацию новых территорий, включающих в себя затраты на прокладку сети газопроводов, установку контролирующего и управляющего оборудования, поставку приборов газопотребления [2, 3].

### Модель развития сети газоснабжения

Для решения этой задачи предложено использовать положения теории перколяции на ограниченных решетках. Решетка заданной размерности имитирует территорию, требующую газификации. В каждом узле решетки задаются определенные условия, исходя из которых формируется перколяционный кластер [4]. Анализ длины кластера, с учетом заданного числа потребителей позволяет определить затраты на газификацию данной территории. Достоинством применения

теории перколяции является возможность построения трассы газопровода с учетом особенностей местности и расположения потребителей [4].

Для моделирования сети газоснабжения на заданной территории с использованием теории перколяции предлагается следующий алгоритм:

1. Исходя из географических размеров газифицируемой территории и числа объектов на ней, выбираем размеры перколяционной решетки. Обычно используются квадратные решетки  $n \times n$ , но также возможно применение прямоугольной решетки  $n \times l$  (согласно условиям моделирования). В результате размеры решетки будут соответствовать размерам газифицируемой территории в определенном масштабе, а узлы решетки определяют возможные координаты газифицируемых и негазифицируемых объектов, а также участков местности с определенными характеристиками.

2. Исходя из числа планируемых потребителей на данной территории, заполняем решетку случайным образом. Занятая клетка решетки означает наличие газифицируемого объекта.

3. Распределяем по решетке условия, ограничивающие прокладку газопровода. Это реализуется заданием определенных числовых параметров для каждого узла решетки.

4. Задаем клетку решетки, определяющую точку ввода газа (возможно задание нескольких точек ввода).

5. Осуществляем построение перколяционного кластера с условием достижения кластером всех объектов, требующих газификации.

6. По окончании построения кластера рассчитываем его длину и затраты на газификацию данной территории.

Если расположение объектов газификации на заданной территории заранее известно, то построение перколяционного кластера позволяет провести трассу газопровода оптимальным образом и максимально точно определить затраты на газификацию.

Отдельный интерес представляет задача прогнозирования расходов на газификацию территории, планируемой под застройку жилыми и промышленными объектами, когда задано только планируемое число газифицируемых объектов, а их расположение на данный момент неизвестно. В этом случае предлагается провести серию модельных расчетов на решетке заданного размера со случайным распределением объектов, требующих газификации, с дальнейшим статистическим анализом полученных данных по возможным затратам на газификацию.

### Результаты моделирования и обсуждение

Приведем примеры функционирования предложенной модели для малых и больших перколяционных решеток с произвольным распределением заданного числа объектов, требующих газификации.

Для апробации модели, в качестве малых решеток выбраны решетки размерностью  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $10 \times 10$ ; в качестве больших – размерностью  $50 \times 50$ ,  $75 \times 75$ ,  $100 \times 100$ ,  $200 \times 200$ . Для моделирования распределения объектов, требующих газификации, выбраны следующие значения доли потребителей в общем количестве объектов на газифицируемой территории: 15, 65, 85 %. Для каждой размерности решетки и распределения газифицируемых объектов проведено моделирование 100 вариантов распределения с построением перколяционных кластеров и расчетом: максимального значения удельных затрат  $K_{\max}$ , минимального значения удельных затрат  $K_{\min}$ , среднего значения удельных затрат  $K_{\text{ср}}$  и моды ряда полученных значений удельных затрат  $K_{\text{mod}}$ .

Таблица 1

**Удельные затраты  $K$  на газификацию территорий на малых решетках для 15, 65 и 85 % планируемых потребителей газа в общем количестве объектов**

Размерность решетки	$K_{\max}$	$K_{\min}$	$K_{\text{ср}}$	$K_{\text{mod}}$
15 %				
3×3	0,33	0,01	0,186	0,22
5×5	0,40	0,12	0,260	0,24
10×10	0,31	0,15	0,236	0,23
65 %				
3×3	0,89	0,33	0,827	0,88
5×5	0,88	0,40	0,770	0,76
10×10	0,83	0,44	0,790	0,79
85 %				
3×3	1,00	0,56	0,993	1,000
5×5	0,96	0,68	0,942	0,960
10×10	0,95	0,69	0,940	0,933

В таблице 1 представлены результаты прогнозирования удельных затрат  $K$  на газификацию территорий на малых решетках для доли планируемых потребителей газа в общем количестве объектов на газифицируемой территории, равной 15, 65 и 85 %.

Исходя из данных, представленных в табл. 1, для малых решеток наблюдаются следующие зависимости коэффициента удельных затрат на газификацию:

1) рост удельных минимальных затрат на газификацию  $K_{\min}$  при увеличении размерности решетки и(или) увеличении доли планируемых потребителей газа в общем количестве объектов на газифицируемой территории;

2) при небольшом количестве планируемых потребителей (15 % газифицируемых объектов в общем числе объектов) рост средних затрат на газификацию  $K_{\text{ср}}$  при увеличении размерности решетки. При этом мода ряда полученных значений удельных затрат  $K_{\text{mod}}$  с ростом размерности решетки практически не меняется;

3) при умеренном количестве планируемых потребителей (65 % газифицируемых объектов в общем числе объектов) значения удельных максимальных затрат  $K_{\max}$  уменьшаются с ростом размерности решетки. Для значений удельных средних затрат  $K_{\text{ср}}$  и моды ряда полученных значений удельных затрат  $K_{\text{mod}}$  наблюдается определенное минимальное значение затрат при размерности решетки  $5 \times 5$ ;

4) при значительном количестве планируемых потребителей (85 % газифицируемых объектов в общем числе объектов), значения удельных максимальных, средних затрат и моды ряда полученных значений удельных затрат уменьшаются с ростом размерности решеток.

В таблице 2 представлены результаты прогнозирования удельных затрат  $K$  на газификацию территорий на больших решетках для доли планируемых потребителей газа в общем количестве объектов на газифицируемой территории, равной 15, 65 и 85 %.

Таблица 2

Удельные затраты  $K$  на газификацию территорий на больших решетках для 15, 65 и 85 % планируемых потребителей газа в общем количестве объектов

Размерность решетки	$K_{\max}$	$K_{\min}$	$K_{\text{ср}}$	$K_{\text{mod}}$
15 %				
50×50	0,237	0,15	0,2257	0,2296
75×75	0,234		0,2253	0,2220
100×100	0,232		0,2250	0,2258
200×200	0,227			0,2250
65 %				
50×50	0,840	0,53	0,793	0,810
75×75	0,805	0,528	0,794	0,798
100×100	0,803	0,530	0,795	0,799
200×200	0,802	0,523		
85 %				
50×50	0,941	0,648	0,932	0,937
75×75	0,940	0,653	0,933	
100×100	0,939	0,647	0,934	0,938
200×200			0,933	0,937

Исходя из данных, представленных в табл. 2, для больших решеток наблюдаются отличные от малых решеток зависимости коэффициента удельных затрат на газификацию:

1) при небольшом количестве планируемых потребителей (15 %) – уменьшение удельных максимальных  $K_{\max}$  и средних затрат  $K_{\text{ср}}$  на газификацию при увеличении размерности решетки. При этом удельные минимальные затраты  $K_{\min}$  не меняются;

2) при умеренном количестве планируемых потребителей (65 %) – уменьшение удельных максимальных затрат на газификацию  $K_{\max}$  при увеличении размерности решетки. При этом значения удельных минимальных, средних затрат и моды ряда значений удельных затрат практически не изменяются с ростом размерности решетки;

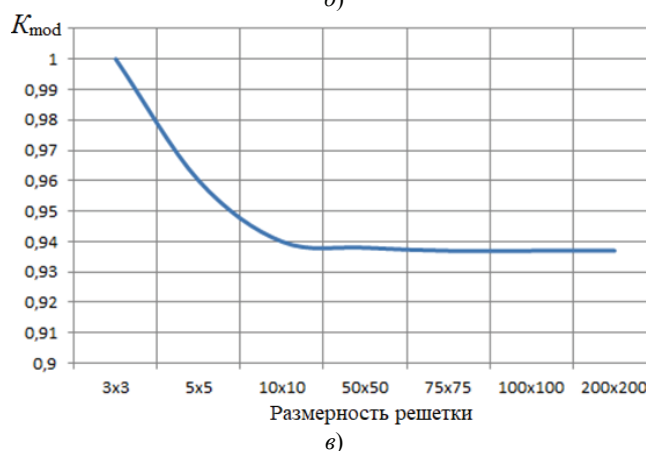
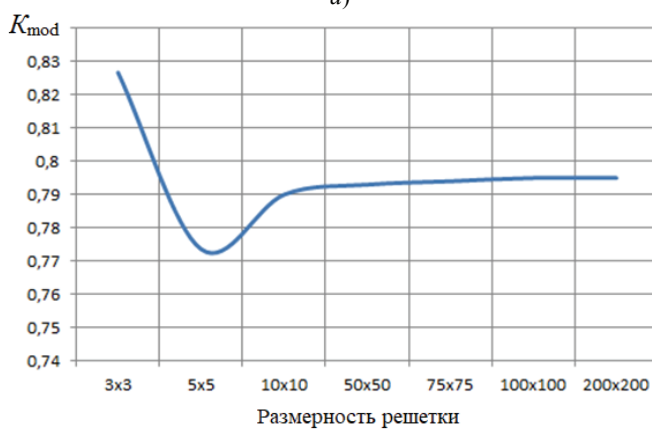
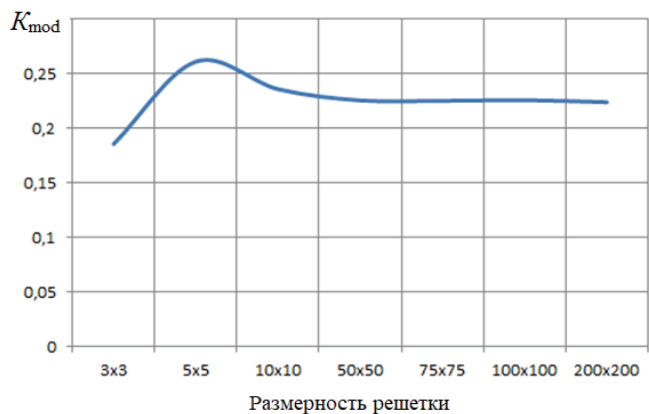
3) при значительном количестве планируемых потребителей (85 %) значения показателей удельных затрат практически не зависят от размерности решетки.

Сравнивая значения удельных затрат на газификацию для малых и больших решеток, необходимо отметить ожидаемое снижение удельных затрат при планируемой газификации больших территорий. Как показали результаты моделирования, анализ по малым и большим решеткам не дает четкого представления о возможной зависимости размера газифицируемой территории от определенного значения доли планируемых потребителей газа в общем количестве объектов.

На рисунке 1 построены графики зависимости  $K_{\text{mod}}$  от размера решетки, из которых можно сделать вывод о наличии оптимального размера газифицируемой территории для определенного значения доли планируемых потребителей газа в общем количестве объектов.

При небольшом числе планируемых потребителей наблюдается выраженный максимум удельных затрат на газификацию в районе размерности решетки 5 × 5 (см. рис. 1, а). При этом минимальные удельные затраты отмечены на самой ма-

ленькой из рассмотренных решеток размерностью  $3 \times 3$ . Рост размерности решетки за максимальным значением удельных затрат практически не влияет на их величину. Соответственно, при небольшом числе планируемых потребителей, оптимальным размером территории для газификации являются небольшие территории.



**Рис. 1. Зависимость  $K_{mod}$  от размера решетки для доли потребителей в общем количестве объектов на газифицируемой территории, составляющем 15 (а), 65 (б) и 85 (в) %**

При умеренном числе планируемых потребителей (см. рис. 1, б) наблюдается выраженный минимум удельных затрат на газификацию в районе размерности решетки  $5 \times 5$ . При этом максимальные удельные затраты отмечены на самой маленькой из рассмотренных решеток размерностью  $3 \times 3$ . Рост размерности решетки за минимальным значением удельных затрат практически не влияет на их величину. Соответственно, при умеренном количестве планируемых потребителей, необходимо стараться уйти от газификации небольших территорий.

Оптимальным вариантом в этом случае будет газификация территорий, размер которых можно смоделировать размерностью решетки  $5 \times 5$ , или газификация крупных районов.

При значительном числе планируемых потребителей (см. рис. 1, в), наблюдается ожидаемое снижение удельных затрат на газификацию с ростом размерности решетки. При этом для крупных решеток наблюдается постоянство удельных расходов вне зависимости от роста размерности решетки. Соответственно, при значительном числе планируемых потребителей, оптимальным решением с точки зрения снижения удельных затрат будет газификация крупных территорий.

### Заключение

Таким образом, предложенный алгоритм моделирования сети газоснабжения на заданной территории, базирующийся на положениях теории перколяции, позволяет определить оптимальную площадь района газификации для произвольного распределения заданного количества объектов, требующих газификации, при которой удельные расходы на прокладку газопровода будут минимальны.

#### *Список литературы*

1. Брюханов, О. Н. Основы эксплуатации оборудования и систем газоснабжения / О. Н. Брюханов. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 256с.
2. Кускильдин, Т. Р. Актуальные проблемы развития газовых сетей и основные направления повышения эксплуатационной надежности газораспределительных систем / Т. Р. Кускильдин, М. Е. Дмитриев, Б. Н. Мастобаев // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 3. – С. 40 – 45.
3. Сторонский, Н. М. Актуальные проблемы развития газификации и оценки перспективной потребности в газе при корректировке генеральных схем газоснабжения и газификации регионов / Н. М. Сторонский, М. Г. Сухарев, Р. В. Самойлов [и др.] // Газовая промышленность. – 2021. – № 10(822). – С. 88 – 96.
4. Тарасевич, Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю. Ю. Тарасевич. – М.: УРСС, 2002. – 112с.
5. Пахомов, А. Н. Применение клеточных автоматов при моделировании процесса ультрафиолетового обеззараживания воды / А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 2. – С.255 – 262. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.255-262
6. Пахомов, А. Н. Возможности самоорганизации дисперсных систем при сушке на подложке / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, Е. А. Ильин // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 3. – С.633 – 637.

## Modeling the Development of the Gas Supply Network Using the Theory of Percolation

Yu. V. Pakhomova<sup>1</sup>, V. V. Kiladze<sup>2</sup>, N. Ts. Gatapova<sup>1</sup>, A. Yu. Orlov<sup>3</sup>

*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:** gas consumption; gas supply; expenses; optimization; percolation; forecasting; development; regulation; territory.

**Abstract:** It is proposed to apply the provisions of the percolation theory to modeling the development of a gas supply network in a certain geographical area, characterized by a predictable number of objects requiring gasification. Modeling the gas supply network on various percolation grids makes it possible to determine the optimal area of the gasification area, in which the specific costs for laying a gas pipeline will be minimal. The results of modeling on small and large percolation grids with an arbitrary distribution of a given number of objects requiring gasification are presented.

### References

1. Bryukhanov O.N. *Osnovy ekspluatatsi i oborudovaniya i sistem gazosnabzheniya* [Fundamentals of operation of equipment and gas supply systems], Moscow: INFRA-M, 2005, 256 p. (In Russ.).
2. Tarasevich Yu.Yu. *Perkolyatsiya: teoriya, prilozheniya, algoritmy* [Percolation: theory, applications, algorithms], Moscow: URSS, 2002, 112 p. (In Russ.).
3. Kuski'din T.R., Dmitriyev M.Ye., Mastobayev B.N. [Actual problems of development of gas networks and the main directions of improving the operational reliability of gas distribution systems], *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya* [Transport and storage of oil products and hydrocarbon raw materials], 2016, no. 3, pp. 40-45. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Storonskiy N.M., Sukharev M.G., Samoylov R.V., Tverskoy I.V., Akosta A.A. [Actual problems of development of gasification and assessment of prospective gas demand when adjusting the general schemes for gas supply and gasification of regions], *Gazovaya promyshlennost'* [Gas industry], 2021, no. 10(822), pp. 88-96. (In Russ., abstract in Eng.)
5. 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.).
6. 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.).

## **Modellierung der Entwicklung des Gasversorgungsnetzes durch die Anwendung der Theorie der Perkolation**

**Zusammenfassung:** Es ist vorgeschlagen, die Bestimmungen der Perkolationstheorie auf die Modellierung der Entwicklung eines Gasversorgungsnetzes in einem bestimmten geografischen Gebiet anzuwenden, das durch eine vorhersehbare Anzahl von Objekten gekennzeichnet ist, die einer Vergasung bedürfen. Die Modellierung des Gasversorgungsnetzes auf verschiedenen Perkulationsnetzen ermöglicht es, den optimalen Bereich des Vergasungsgebiets zu bestimmen, in dem die spezifischen Kosten für die Verlegung einer Gasleitung minimal sind. Es sind die Ergebnisse der Modellierung an kleinen und großen Versickerungsgittern mit einer beliebigen Verteilung einer bestimmten Anzahl von zu vergasenden Objekten vorgestellt.

---

## **Modélisation du développement du réseau d'approvisionnement en gaz à l'aide de la théorie de la percolation**

**Résumé:** Est proposée une application des formules de la théorie de la percolation envers la modélisation du développement d'un réseau d'approvisionnement en gaz dans une zone géographique donnée caractérisée par le nombre prévu d'objets nécessitant une gazéification. La modélisation du réseau d'approvisionnement en gaz sur les différents réseaux de gazoduc permet de déterminer la superficie optimale de la zone de gazoduc dans laquelle le coût unitaire de la pose du gazoduc sera minimale. Sont présentés résultats de la simulation sur des réseaux de percolation petits et grands avec une distribution arbitraire d'un nombre donné d'objets nécessitant une gazéification.

---

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

---