© А. А. Вельниковский, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: avelnikovskiy@inbox.ru

© A. A. Vel'nikovskiy, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: avelnikovskiy@inbox.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ГАЗОНАПОЛНИТЕЛЬНЫХ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

MODELING OF THE INFRASTRUCTURE OF CNG STATIONS IN SAINT PETERSBURG

Изложена методика моделирования инфраструктуры автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) с учетом тенденции и прогноза развития парка газомоторных автомобилей. Разработана математическая модель, позволяющая оптимизировать расположение сети новых АГНКС в Санкт-Петербурге, с учетом мест базирования потребителей газомоторного топлива. Представлено решение нелинейной задачи оптимизации инфраструктуры АГНКС исходя из условия минимизации плеча заправки между потребителями газомоторного топлива и АГНКС.

Ключевые слова: газобаллонный автомобиль, газомоторное топливо, автомобильная газонаполнительная компрессорная станция.

The article describes the modeling technique of compressed natural gas (CNG) stations' infrastructure, taking into account the trends and forecasting of the motor vehicle park development. A mathematical model has been developed which allows optimizing the network location of new CNG filling stations in St. Petersburg, with due consideration of the locations of motor fuel consumers. The author presents the solution of nonlinear optimization problem of the CNG stations infrastructure optimization proceeding from the condition of minimizing the distance between the filling stations and potential CNG consumers.

Keywords: compressed gas vehicle, gas fuel, CNG filling stations.

В Стратегии экономического и социально-го развития Петербурга было проанализировано пространственно-территориальное развитие города до 2030 года [6]. В ней для достижения гармоничного совершенствования мегаполиса разработана перспективная программа «Развитие транспортной системы Петербурга» (далее — Программа). Особое внимание уделяется развитию газомоторного рынка города, что обуславливает строительство новых АГНКС [6].

Решение этой масштабной по значимости и капитальным вложениям задачи требует системного подхода к ней, который предполагает последовательное решение следующих вопросов:

1. Формирование массива исходных данных по характеристике газомоторного топлива (ГМТ) (их число, состав и количество газомоторных автомобилей, районы дислокации и т. д.).

2. Определение потребности в ГМТ.

3. Оценка наличия и возможностей существующих АГНКС Санкт-Петербурга.

4. Моделирование инфраструктуры АГНКС Санкт-Петербурга.

Используя данные открытых источников и современные интернет-технологии, в частности карты «2 ГИС», найдены адреса базирования потребителей ГМТ и существующей АГНКС-1 с соответствующими географическими координатами по широте φ_i и долготе ψ_i . Методика моделирования инфраструктуры АГНКС предполагает полученные сферические координаты дислокации потребителей перевести в декартовы.

Применяя формулы перехода от сферической системы координат к декартовой, получаем искомым результат в виде [3]

$$x_i = R_0 \cos(\varphi_i \frac{\pi}{180^\circ}) \cos(\psi_i \frac{\pi}{180^\circ}); \quad (1)$$

$$y_i = R_0 \cos(\phi_i \frac{\pi}{180}) \sin(\psi_i \frac{\pi}{180}), \quad (2)$$

где ϕ_i и ψ_i — широты и долготы рассматриваемых объектов в градусах; x_i и y_i — их декартовы координаты; $R_0 = 6371$ км — средний радиус Земли.

Координаты сферической и декартовой системы координат потребителей ГМТ, АГНКС-1, численность их газомоторного парка (N_i) среднее время заправки (t , ч), потребность в ГМТ представлены в таблице, которая является массивом исходных данных для последующего моделирования инфраструктуры АГНКС.

Анализ существующей сети АГНКС показал ее неразвитость и удаленность существующих АГНКС от потенциальных потребителей (автобусных парков, АТП, автостоянок, гаражных кооперативов и т. п.), а также необходимость подвода газа, предполагаемое давление и производительность газопровода. Существуют серьезные ограничения: площадь территории, расположение окружающих объектов, которые зачастую упускаются при планировании строительства, наличие необходимой электрической мощности, поскольку у АГНКС по сравнению с обычной АЗС гораздо большее энергопотребление. Следует учитывать среднюю загрузку АГНКС и особенности по времени суток, которые влияют на оптимальный выбор компрессора.

Таким образом, требуется разработать такую эффективную инфраструктуру АГНКС, которая была бы свободна от указанных недостатков и удовлетворяла потребности заявителей в ГМТ с перспективой до 2030 года.

Моделирование инфраструктуры АГНКС производится по следующей методике [4]. На начальном (нулевом) шаге по координатам (x_i , y_i) находим ближайших к имеющейся АГНКС-1 потребителей ГМТ, запросы которых могут быть удовлетворены суточной пропускной способностью данной АГНКС, и строим граф минимального плеча пробега до заправки ГБА. Затем этот алгоритм, называемый итерацией, повторяется i число раз для каждого оставшегося потребителя ГМТ.

Далее для оставшихся потребителей решается нелинейная задача безусловной оптимизации [5], в рамках которой находим координаты новой станции j исходя из минимального плеча пробега до заправки, с учетом численности транспортных единиц у каждого потребителя, т. е.

$$F = \sum_i ((x_i - x(j))^2 + (y_i - y(j))^2) N_i \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $x(j)$ и $y(j)$ — искомые координаты АГНКС; x_i и y_i — известные координаты потребителей (см. таблицу); N_i — количество ГБА у каждого потребителя.

Так как целевая функция F является выпуклой, то эта задача представляется унимодальной, т. е. имеет одно решение.

Если в процессе реализации этого алгоритма на какой-нибудь стадии итерации выясняется, что добавление очередного потребителя приводит к превышению возможностей рассматриваемой на данном шаге АГНКС, то какая-то часть его ГБА будет заправляться на этой АГНКС, а необслуженные ГБА — на другой АГНКС, что будет учитываться в дальнейших расчетах.

Графическая интерпретация моделирования инфраструктуры АГНКС (А) представлена на рисунке и поясняется следующим образом. В процессе итерационных вычислений, по всей совокупности потребителей вычисляется «центр массы» в необходимом ГМТ, куда помещается АГНКС (точка 1), и к ней «притягиваются» потребители с минимальным плечом заправки.

Эти потребители ГМТ находятся в кольце с радиусом R_1 , а в центре его располагается АГНКС. После того как возможности по за-

Графическая интерпретация моделирования инфраструктуры АГНКС

Координаты расположения и количество газобаллонного автотранспорта (ГБА)

№	Наименование предприятия	Широта φ , град.	Долгота ψ , град.	Координата x , км	Координата y , км	Кол-во машин N , шт.	Среднее время заправки t , ч
ГУП «Пассажиравтотранс»							
1	АП № 1 (производство № 2)	59,90587	30,406289	2755,174	1616,858	48	0,30
2	АП № 1	59,907711	30,356038	2756,439	1614,351	52	0,30
3	АП № 2 (головное предприятие)	60,028366	30,263273	2749,017	1604,033	135	0,30
4	АП № 5	59,859695	30,261101	2763,099	1612,109	79	0,30
5	АП № 6	59,968646	30,443929	2748,903	1615,606	63	0,30
6	АП № 7 (головное предприятие)	59,834742	30,308009	2763,849	1615,581	176	0,30
7	АП № 7 (производство № 2)	59,696681	30,394329	2772,853	1626,454	54	0,30
8	Колпинский автобусный парк	59,75293	30,566683	2763,297	1632,041	93	0,30
ООО «Питеравто»							
9	Филиал Салова	59,891787	30,38966	2756,812	1616,743	77	0,30
10	Филиал Энергетиков	59,962446	30,441268	2749,493	1615,781	84	0,30
11	Филиал Пушкин	59,696681	30,394329	2772,853	1626,454	55	0,30
12	Филиал Колпино	59,757728	30,609545	2761,678	1633,873	98	0,30
13	Филиал Петергоф	59,865291	29,81418	2775,123	1590,24	69	0,30
14	ОАО «Третий парк»	59,98793	30,319847	2750,793	1608,712	148	0,30
Специализированные автотранспортные предприятия							
15	Центральная а/к 1	59,932103	30,345369	2754,71365	1612,65217	97	0,20
16	Центральная а/к 2	59,930539	30,382334	2753,8025	1614,50519	86	0,20
17	Достоевская а/к	59,912454	30,333861	2756,66933	1613,05371	78	0,20
18	Суворовская а/к	59,926977	30,381481	2754,12223	1614,63755	89	0,20
19	Дворцовая а/к	59,912454	30,333861	2756,66933	1613,05371	123	0,20
20	Кременчугская а/к	59,928429	30,380017	2754,04295	1614,49651	85	0,20
21	Адмиралтейская а/к	59,899929	30,294973	2758,80395	1611,79018	96	0,20
22	Василеостровская а/к	59,93873	30,246491	2756,94165	1607,57459	73	0,20
23	Гаванская а/к	59,933275	30,223908	2758,02866	1606,75208	68	0,20
24	Октябрьская а/к	59,949496	30,253453	2755,85126	1607,38753	76	0,20
25	Каменноостровская а/к	59,969304	30,291578	2753,13472	1608,2592	89	0,20
26	Петроградская а/к	59,969304	30,291578	2753,13472	1608,2592	67	0,20
27	Московская а/к	59,891137	30,308448	2759,15497	1612,86577	93	0,20
28	Рощинская а/к	59,878527	30,339	2759,34134	1614,94947	78	0,20
29	Южная а/к	59,821046	30,303328	2765,11799	1616,01995	67	0,20
30	Пулковская а/к	59,830499	30,357541	2762,80357	1618,17632	91	0,20
31	Невская а/к	59,857961	30,448388	2757,95813	1621,21689	85	0,20
32	2-й луч а/к	59,906499	30,398324	2755,34692	1616,4441	74	0,20
33	Купчинская а/к	59,862438	30,423962	2758,2778	1619,82298	67	0,20
34	Фрунзенская а/к	59,887747	30,379487	2757,43442	1616,45042	73	0,20
35	Лиговская а/к	59,900917	30,348728	2757,20853	1614,32976	67	0,20
36	Транспортная а/к	59,93873	30,246491	2756,94165	1607,57459	207	0,20
	АГНКС-1	59,816384	30,326369	2764,855	1617,358		

правке данной АГНКС будут исчерпаны, потребители, входящие в круг 1, из дальнейшего рассмотрения удаляются. Далее вычисляется «центр массы» оставшихся потребителей в круге с радиусом R_2 , куда помещается АГНКС-2 (точка 2). После того как ее возможности будут полностью реализованы, ближайшие потребители ГМТ, входящие в круг 2, из дальнейшего рассмотрения удаляются. Аналогично, для оставшихся потребителей с радиусом R_3 , входящих в круг 3, вычисляется «центр массы» (точка 3), куда помещается АГНКС-3, и т. д. Надо иметь в виду, что ряд периферийных потребителей могут быть распределены ассиметрично относительно остальных (точка 4) и поэтому их «центр массы» расположен не в центре.

Таким образом, применение алгоритма итерации размещения АГНКС по критерию минимального плеча пробега до заправки обеспечивает равномерное расположение АГНКС по отношению к потребителям ГМТ. При этом следует обеспечить комплексное выполнение следующих условий: безопасное функционирование инфраструктуры АГНКС; рациональную привязку сети АГНКС к магистральным газопроводам и дорожной инфраструктуре города.

Библиографический список

1. Вельниковский А. А., Глазков В. Ф. Прогнозирование газомоторного рынка Санкт-Петербурга на основе регрессионной модели суточного потребления автотранспортом газомоторного топлива // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 6 (59). С. 209–212.

2. Глазков В. Ф., Евтюков С. А. Основы теории надежности, работоспособности и диагностики машин: учеб. пособие. СПб.: ИД «Петрополис», 2011. 450 с.

3. Куликова Е. В. Высшая математика для горных вузов: учеб. пособие. Ч. 1. Аналитическая геометрия и элементы линейной алгебры. М.: Горная книга, 2012. 504 с.

4. Лунгу К. Н. Линейное программирование. М.: Физматлит, 2005. 128 с.

5. Майорова Н. Л. Методы оптимизации: учеб. пособие. Ярославль: ЯрГУ, 2015. 112 с.

6. Стратегия экономического и социального развития Санкт-Петербурга на период до 2030 года. URL: <http://www.spbstrategy2030.ru>

References

1. Vel'nikovskiy A. A., Glazkov V. F. *Prognozirovanie gazomotornogo rynka Sankt-Peterburga na osnove regressionnoy modeli sutochnogo potrebleniya avtotransportom gazomotornogo topliva* [Forecasting the gas motor fuel market of Saint-Petersburg on the basis of regression model of vehicle daily consumption of natural gas fuel]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 6 (59), pp. 209–212.

2. Glazkov V. F., Evtukov S. A. *Osnovy teorii nadezhnosti, rabotosposobnosti i diagnostiki mashin. Ucheb. posobie* [Basics of the theory of reliability, working capacity and diagnostics of cars. Teaching manual]. St. Petersburg, Petropolis Publ., 2011, 450 p.

3. Kulikova E. V. *Vyshshaya matematika dlya gornykh vuzov. Ucheb. posobie* [Advanced mathematics for mining higher education institutions. Teaching manual]. Ch.1. *Analiticheskaya geometriya i ehlementy lineynoy algebr* [Pt. 1. Analytical geometry and elements of linear algebra]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2012, 504 p.

4. Lungu K. N. *Lineynoe programmirovaniye* [Linear programming.]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 128 p.

5. Mayorova N. L. *Metody optimizatsii. Uchebyu posobie* [Optimization methods. Teaching manual]. Yaroslavl, YarSU Publ., 2015, 112 p.

6. *Strategiya ehkonomicheskogo i sotsial'nogo razvitiya Sankt-Peterburga na period do 2030goda* [The strategy of economic and social development of St. Petersburg till 2030]. Available at: <http://www.spbstrategy2030.ru>