УДК 629.33:005.52-021.272

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

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-260-264

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

ПЕРСПЕКТИВА РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ АГНКС САНКТ-ПЕТЕРБУРГА С УЧЕТОМ ТРАНЗИТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

THE PROSPECT OF THE DEVELOPMENT OF THE INFRASTRUCTURE OF CNG STATIONS IN SAINT-PETERSBURG TAKING INTO ACCOUNT THE TRANSIT TRANSPORT FLOWS

Произведено моделирование инфраструктуры автомобильной газонаполнительной компрессорной станции (АГНКС) Санкт-Петербурга на основе интерактивной математической модели с учетом перспективы развития города как крупнейшего торгово-транспортного центра международного значения. На основе анализа и тенденций увеличения транспортных потоков газомоторных автомобилей были определены их интегральные и дифференциальные характеристики по наиболее значимым магистралям города. Это позволило оценить среднесуточную и годовую потребности в заправке машин ГМТ на каждой из них, а также необходимое число и производственные возможности АГНКС на каждом из рассматриваемых съездов на КАД. Представленная инфраструктура АГНКС Санкт-Петербурга позволит полностью удовлетворить заявки потребителей по заправке газомоторным топливом.

Ключевые слова: интерактивная математическая модель (ИММ), инфраструктура, транзитные потоки (ТП), газомоторное топливо (ГМТ), компримированный природный газ (КПГ), газобаллонные автомобили (ГБА), автомобильная газонаполнительная компрессорная станция (АГНКС), кольцевая автомобильная дорога (КАД).

The article presents the results of simulation of the infrastructure of compressed natural gas (CNG) stations in Saint-Petersburg on the basis of the interactive mathematical model taking into account the perspective development of the city as potentially the largest trade and transport center of international significance. Based on the analysis and trends of the increasing traffic flow of GMF vehicles, there were assessed their integral and differential characteristics in regard to the most important thoroughfares of the city. The results of the study allowed estimating the average daily and annual demand for GMF filling, as well as the required number and operation capabilities of the CNG stations at each entry to the ring motor road. The infrastructure of CNG stations in St. Petersburg presented in the article will allow to fully meet the demand of consumers for the refueling the cars with gas motor fuel.

Keywords: interactive mathematical model (IMM), infrastructure, transit flows (TF), gas motor fuel (GMF), compressed natural gas (CNG), compressed gas automobiles (GGA), automobile gas-filling compressor station (AGNKS, CNG station), ring motor road (KAD).

В Стратегии экономического и социального развития Санкт-Петербурга на период до 2030 года отображены перспективы развития города со статусом крупнейшего торгово-транспортного центра международного значения [13]. Санкт-

Петербург — транзитный автомобильный и морской портовый город. Ежедневно по основным автотранспортным магистралям города проходят транзитные потоки, исчисляемые сотнями тысяч машин, выполняющих грузовые и пасса-

жирские перевозки. Это обстоятельство создает проблему их заправки ГМТ. Концептуальный подход к решению данной проблемы предложен ниже.

Санкт-Петербург характеризуется плотной застройкой, где достаточно сложно найти свободные участки для строительства АГНКС и обеспечить их безопасное функционирование. Кроме этого, следует иметь в виду, что магистральный газопровод, который запитывал бы сеть АГНКС в границах города, проложен практически по контуру кольцевой автодороги (КАД). Эти препятствия существенно затрудняют и практически исключают создание инфраструктуры АГНКС в черте города. Отсутствие инфраструктуры АГНКС тормозит перевод автотранспортных средств на ГМТ, что, с одной стороны, ухудшает экологическую ситуацию в регионе, а с другой — снижает экономические показатели работы автотранспортных предприятий из-за потребления более дорогого топлива, получаемого при переработке нефти (бензин, дизельное топливо), что обнуляет Распоряжение Правительства РФ по переводу работы автотранспорта на ГМТ.

Министерство транспорта РФ после 2020 года в Ленинградской области планирует строительство КАД-2. Все эти обстоятельства наводят на мысль, что инфраструктуру АГНКС было бы целесообразно расположить вблизи от КАД, используя имеющиеся с нее съезды. В этом случае более легко найти места дислокации АГНКС; упрощается процедура согласования их строительства; существенно удешевляются затраты на газоснабжение АГНКС, что приводит к уменьшению себестоимости ГМТ; появляется возможность эффективно и наиболее полно удовлетворить потребности в ГМТ все возрастающего транзитного автотранспортного потока; обеспечивается безопасное функционирование АГНКС.

Транзитные автотранспортные потоки проходят по пяти наиболее загруженным в точках пересечения с КАД направлениям: Выборгскому, Мурманскому, Московскому, Киевскому и Таллинскому. Данные по интенсивности движения автотранспорта на этих транзитных магистралях были получены с помощью датчиков автомати-

зированного учета СПбГБУ «Центр транспортного планирования Санкт-Петербурга» [15].

С целью обеспечения эффективной заправки городских и транзитных потребителей ГМТ произведено интерактивное моделирование инфраструктуры АГНКС. Для этого предварительно гипотетически расставим АГНКС вдоль КАД на 26 существующих съездах. Используя критерии «минимального плеча» заправки ГБА, определим потоки потенциальных потребителей ГМТ к предполагаемым АГНКС.

Пусть A_j соответствуют АГНКС и являются пунктами отправления (съезды с КАД), где $j = 1, 2, \dots, 26$; b_i — это потребители КПП, т. е. пункты назначения, число которых $i = 1, 2, \dots, 54$, с заявками на ГМТ, в объемах v_i .

В качестве переменных в данной модели выберем объем суточного потребления КПП i -м потребителем на j -й АГНКС (v_{ij}).

Тогда суммарный объем заправки v_{ij} для потребителей b_i составит

$$\sum_{j=1}^{26} v_{ij} = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, 54, \quad (1)$$

где $v_{ij} = n_{ij}v_{0i}$; n_{ij} — количество ГБА у i -го потребителя, заправающегося на j -й АГНКС; v_{0i} — среднесуточный расход КПП ГБА у i -го потребителя.

Целевая функция инфраструктуры АГНКС определяется требованием обеспечения «минимального плеча» заправки ГБА, означающего, что его пробег $f_{ij'}$ для каждого из потребителей b_i к какой-либо АГНКС должен быть минимальным. Тогда $f_{ij'}$ можно представить в виде следующей зависимости:

$$f_{ij'} = \min \sqrt{(x_i - ax_j)^2 + (y_i - ay_j)^2}, \quad (2)$$

$$j \in 1, 2, \dots, 26,$$

$$i \in 1, 2, \dots, 54,$$

где x_i и y_i — декартовы координаты потребителей b_i ; ax_j и ay_j — декартовы координаты j -й АГНКС.

В отличие от классической транспортной задачи, в рассматриваемой модели ограничения на запасы КПП на АГНКС не ставятся. Таким образом, для каждого i -го потребителя находится ближайшая к нему j -я АГНКС, а общий объем необходимого КПП V_j определяется запросами потребителей

$$V_j = \sum_{i'} n_{i'} v_{0i'}. \quad (3)$$

Суммирование объемов КПП по выражению (3) осуществляется по тем потребителям, для которых j -я АГНКС оказалась ближайшей, их номера i' ; $t_{i'}$ — время заправки КПП одним ГБА.

Тогда из возможных 26 точек дислокации АГНКС реально могут использоваться только 15, а остальные не являются оптимальными с точки зрения минимального плеча заправки, и поэтому строительство АГНКС в оставшихся 11 точках нецелесообразно.

В выбранных местах расположения АГНКС их количество и тип определяются суммарным суточным потреблением КПП V_j и продолжительностью работы T_j :

$$T_j = \sum_{i'} n_{i'j} t_{i'}, \quad (4)$$

где $t_{i'}$ — время заправки КПП одним ГБА i -го потребителя.

Предполагается, что АГНКС целесообразно создавать с двух сторон КАД, т. е. в направлении

«в город» и «из города», максимально обеспечив потребности КПП для ГБА, не создавая очередей на заправку.

В конечном виде математическая модель инфраструктуры АГНКС СПб будет представлена в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^{26} v_{ij} &= b_i, \quad i = 1, 2, \dots, 54, \\ f_{i'j'} &= \min \sqrt{(x_i - ax_j)^2 + (y_i - ay_j)^2}, \\ i &\in 1, 2, \dots, 54 \\ j &\in 1, 2, \dots, 26 \\ V_j &= \sum_{i'} n_{i'j} \cdot v_{0i'}, \\ T_j &= \sum_{i'} n_{i'j} t_{i'}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В соответствии с полученной моделью инфраструктуры АГНКС каждый потребитель имеет возможность на ближайшей к нему станции

Графическая модель инфраструктуры АГНКС:
 — съезды с КАД; Б — большая АГНКС (9); С — средняя АГНКС (15); М — малая АГНКС (7)

заправки полностью удовлетворить потребности в ГМТ своих ГБА.

В результате расчетов, полученных при решении интерактивной математической модели инфраструктуры АГНКС Санкт-Петербурга, было получено пространственное представление о ее составе и содержании в виде графической модели с наложением ее на схему КАД и магистральных газопроводов (см. рисунок).

В конечном счете, наиболее целесообразной представляется инфраструктура АГНКС, которая располагается по контуру КАД. Таким образом, предложенная интерактивная математическая модель инфраструктуры АГНКС Санкт-Петербурга позволяет наиболее рационально сформировать соответствующую сеть заправок ГБА газомоторным топливом с перспективой до 2023 года. Указанная инфраструктура АГНКС будет способствовать успешному решению Распоряжения Правительства РФ и повысит эффективность экономических и экологических составляющих автомобильного транспорта.

Библиографический список

1. Вельниковский А. А. Моделирование инфраструктуры автомобильных газонаполнительных компрессорных станций Санкт-Петербурга // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 4 (63). С. 201–204.
2. Вельниковский А. А. Имитационное моделирование инфраструктуры АГНКС Санкт-Петербурга на основе районирования городской территории на кластеры // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 137–141.
3. Гайнуллин Ф. Г., Васильев Ю. Н., Золотаревский Л. С. Принципы проектирования сети АГНКС в городах // Газовая промышленность, 1987.
4. Глазков В. Ф., Евтюков С. А. Основы теории надежности, работоспособности и диагностики машин: учеб. пособие. СПб.: Издательский дом «Петрополис», 2011. 450 с.
5. Евстифеев А. А. Математическая модель процесса заправки транспортных средств КПП на АГНКС // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 1 (37). С. 24–31.
6. Евстифеев А. А. Методология рационального построения и непрерывного совершенствования региональной сети АГНКС // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 3 (39). С. 53–60.
7. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 496 с.

8. Карнов В. В., Коробейников А. В., Малышев В. Ф., Фролькис В. А. Математическая обработка эксперимента и его планирование: учеб. пособие. М.: АСВ; СПб.: СПбГАСУ, 1998. 100 с.

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

10. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: межвузовский тематический сборник трудов / ред. Б. Г. Вагер. СПб.: СПбГАСУ, 2001. 284 с.

11. «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга на 2015–2020 гг.» Государственная программа Санкт-Петербурга (Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 30.06.2014 № 552).

12. Маленкина И. Ф., Ровнер Г., Мкртычан Я. Система обеспечения эффективного развития и эксплуатации сети метановых автозаправочных станций // Нефть и газ РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2005. 274 с.

13. Стратегия экономического и социального развития Санкт-Петербурга на период до 2030 года. Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 13.05.2014 г. № 355.

14. Фролькис В. А. Линейная и нелинейная оптимизация: учеб. пособие для студентов вузов. СПб.: СПбГАСУ, 2001. 305 с.

15. «Центр транспортного планирования Санкт-Петербурга». Организация и осуществление региональных научно-технических и инновационных программ и проектов в сфере транспортного комплекса Санкт-Петербурга. URL: <http://ctpspb.ru/>

16. Шенон. Имитационное моделирование систем. М.: Мир, 1978. 302 с.

References

1. Vel'nikovskiy A. A. *Modelirovanie infrastruktury avtomobil'nykh gazonapolnitel'nykh kompressornykh stantsiy Sankt-Peterburga* [Modeling of the infrastructure of CNG stations in Saint Petersburg]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 4 (63), pp. 201–204.
2. Vel'nikovskiy A. A. *Imitatsionnoe modelirovanie infrastruktury AGNKS Sankt-Peterburga na osnove rayonirovaniya gorodskoy territorii na klasteriy* [Simulation of the infrastructure of CNG stations in Saint Petersburg on the basis of zoning of the urban area into clusters]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 5 (64), pp. 137–141.
3. Gaynullin F. G., Vasil'ev Yu. N., Zolotarevskiy L. S. *Printsipy proektirovaniya seti AGNKS v gorodakh* [The principles of design of the CNG filling station network in the cities]. *Gazovaya promyshlennost' – Gas Industry*, 1987, no. 5, pp. 16–18.

4. Glazkov V. F., Evtyukov S. A. *Osnovy teorii nadezhnosti, rabotosposobnosti i diagnostiki mashin. Ucheb. posobie* [Basics of the theory of reliability, working capacity and diagnostics of cars]. St. Petersburg, Petropolis Publ., 2011, 450 p.
5. Evstifeev A. A. *Matematicheskaya model' protsessa zapravki transportnykh sredstv KPG na AGNKS* [Mathematical model of process of gas station of CNG vehicles at the CNG filling stations]. *Transport na al'ternativnom toplive – Transport on alternative fuel*, 2014, no. 1 (37), pp. 24–31.
6. Evstifeev A. A. *Metodologiya ratsional'nogo postroeniya i nepreryvnogo sovershenstvovaniya regional'noy seti AGNKS* [Methodology of rational creation and continuous improvement of the CNG filling station regional network]. *Transport na al'ternativnom toplive – Transport on alternative fuel*, 2014, no. 3 (39), pp. 53–60.
7. Zarubin V. S. *Matematicheskoe modelirovanie v tekhnike* [Mathematical modeling in engineering]. Moscow, MSTU named after N. Eh. Bauman Publ., 2010, 496 p.
8. Karpov V. V., Korobeynikov A. V., Malyshev V. F., Frolikis V. A. *Matematicheskaya obrabotka ehksperimenta i ego planirovanie. Ucheb. posobie* [Mathematical processing of the experiment and its planning. Teaching manual]. Moscow, ASV Publ., St. Petersburg, SPSUACE, 1998, 100 p.
9. Lungu K. N. *Lineynoe programmirovaniye* [Linear programming]. Moscow, Fizmatlist Publ., 2005, 128 p.
10. *Matematicheskoe modelirovanie, chislennyye metody i kompleksey program. Trudy mezhvuz. temat. sb.* [Mathematical modeling, numerical methods and complexes of programs. Proc. of the inter-higher education institution coll. of works]. Ed. by Vager B. G. St. Petersburg, SPSUACE, 2001, 284 p.
11. *Razvitie transportnoy sistemy SPb na 2015–2020 gg. Gosudarstvennaya programma St. Peterburga (Postanovlenie Pravitel'stva St. Peterburga ot 30.06.2014 no. 552)*. [Development of the transport system of SPb for 2015–2020. State Program of St. Petersburg (Resolution of the Government of St. Petersburg of 30.06.2014 no. 552)].
12. Malenkina I. F., Rovner G., Mkrtychan Ya. *Sistema obespecheniya ehffektivnogo razvitiya i ehkspluatatsiya seti metanovykh avtozapravochnykh stantsiy* [The system of ensuring effective development and operation of methane gas stations network]. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas Publ., 2005, 274 p.
13. *Strategiya ehkonomicheskogo i sotsial'nogo razvitiya Sankt – Peterburga na period do 2030 goda. Postanovlenie Pravitel'stva Sankt-Peterburga ot 13.05.2014 g. no. 355* [The strategy of economic and social development of St. Petersburg until 2030. Resolution of the Government of St. Petersburg of 13.05.2014 no. 355].
14. Frolikis V. A. *Lineynaya i nelineynaya optimizatsiya. Ucheb. posobie dlya studentov vuzov* [Linear and nonlinear optimization. Teaching manual for students of higher education institutions]. St. Petersburg, SPSUACE, 2001, 305 p.
15. *Tsentr transportnogo planirovaniya Sankt-Peterburga. Organizatsiya i osushchestvleniye regional'nykh nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh programm i proektov v sfere transportnogo kompleksa Sankt-Peterburga* [Center of transport planning of St. Petersburg. Organization and implementation of regional scientific and technical and innovative programs and projects in the sphere of the transport complex of St. Petersburg]. Available at: <http://ctpspb.ru/>
16. Shenon R. *Imitatsionnoye modelirovanie sistem* [Simulation modeling of systems]. Moscow, Mir Publ., 1978, 302 p.