

Применение методов системного анализа для анализа системы транспортировки сжиженного природного газа

Е. В. Посохова¹, И. М. Новожилов^{2✉}, П. А. Мальцев¹,
Т. В. Кухарова¹, М. Е. Подкина¹, А. В. Плотников¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ novozhilovim@list.ru

Аннотация. Исследуются методы системного анализа для анализа нефтегазовой отрасли. Авторы исследуют влияние производственных факторов на загруженность транспортной системы завода по переработке природного газа. Приводятся результаты вычислений многомерного корреляционно-регрессионного анализа показателей функционирования транспортной системы СПГ. Приведенные результаты анализа были использованы в качестве суждений об эффективности производственного процесса транспортировки СПГ в зарубежные регионы. В рамках решения задачи оптимизации технических мощностей была построена имитационная модель ежемесячного функционирования причала загрузки и отгрузки СПГ. На основании полученных данных были составлены рекомендации по улучшению технико-экономических показателей функционирования завода «Сахалин-2».

Ключевые слова: СПГ, многомерный корреляционно-регрессионный анализ, имитационное моделирование, «Сахалин-2».

Для цитирования: Применение методов системного анализа для анализа системы транспортировки сжиженного природного газа / Е. В. Посохова, И. М. Новожилов, П. А. Мальцев, Т. В. Кухарова, М. Е. Подкина, А. В. Плотников // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 7. С. 24–38. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-24-38.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Application of Systems Analysis Methods to the Analysis of Liquefied Natural Gas Transportation System

E. V. Posokhova¹, I. M. Novozhilov^{2✉}, P. A. Maltsev¹,
T. V. Kukharova¹, M. E. Podkina¹, A. V. Plotnikov¹

¹ The Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ novozhilovim@list.ru

Abstract. The methods of system analysis for the analysis of the oil and gas industry are investigated. The authors investigate the influence of production factors on the workload of the natural gas processing plant's transport system. The results of calculations of a multidimensional correlation and regression analysis of the functioning of the LNG transport system are presented. The above analysis results were used as judgments about the efficiency of the production process of LNG transportation to foreign regions. As part of the solution to the problem of optimizing technical capacities, a simulation model of the monthly operation of the LNG loading and shipping berth was built. Based on the data obtained, recommendations were made to improve the technical and economic performance of the Sakhalin-2 plant.

Keywords: LNG, multivariate correlation and regression analysis, simulation modeling, Sakhalin-2.

For citation: Application of systems analysis methods to the analysis of liquefied natural gas transportation system / E. V. Posokhova, I. M. Novozhilov, P. A. Maltsev, T. V. Kukharova, M. E. Podkina, A. V. Plotnikov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 7. P. 24–38. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-24-38.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Актуальность биотоплива неоспорима – на данный момент, по заключениям экологов, экспертов энергетики и промышленников, возобновляемые источники энергии не несут никакого вреда окружающей среде [1]. Если еще в прошлом веке весь мир сидел на так называемой нефтяной игле, то теперь главными рынками сбыта можно по праву считать газодобывающую и газоперерабатывающую промышленности. Солнечные или ветряные источники энергии все еще ненадежны, а потому требуют пристального внимания, огромных денежных затрат и могут быть использованы на полную мощность лишь в некоторых подходящих по условиям климатических зонах, что, учитывая разнообразие климатических зон по всему миру, нерационально.

Сейчас двигателем прогресса и самым желаемым источником энергии можно по праву считать природный газ (ПГ).

Ввиду напряженной геополитической обстановки в европейской части России и отключения самых крупных трубопроводов линии «Северный поток» перед российскими промышленниками встала серьезная задача перевозки ПГ другим путем. Не стоит также забывать, что программа газификации дальних регионов еще не завершена, а значит, перед заводами, занимающимися добычей и переработкой природного газа, стоит сложная задача по обеспечению как внутренних, так и внешних рынков страны. Решением служат стремительно набирающие популярность заводы по производству сжиженного природного газа (СПГ). В сжиженном состоянии ПГ занимает гораздо меньший объем в хранилищах и более безопасен для перевозки на дальние расстояния.

Постановка задачи. С расширением рынка сбыта СПГ ситуация с реализацией заводов по сжижению решительно поменялась. Если раньше компании ориентировали свое внимание на крупнотоннажные производства с обязательной привязкой к крупному месторождению и привлечением зарубежных инвестиций для выгодного сотрудничества, то сейчас все большее распространение получает малотоннажное производство. Сроки контрактов на поставку СПГ снизи-

лись с долговечных 20–25 лет до 18, как и экспортные объемы, а среди потребителей увеличилось число стран с некредитным рейтингом [2].

Все чаще крупнотоннажное производство пропускает сроки поставки СПГ, сметы и общий бюджет эксплуатации растут в цене по причине сложного комплексного технологического процесса. Строительство крупных торговых узлов осложняется в первую очередь необходимостью обустройства месторождений, а также ограниченным потенциалом к интеграции в труднодоступные места добычи газа – например, на удаленных участках шельфа. Небольшие обособленные месторождения остаются неосвоенными из-за трудоемкого подхода к строительству морских платформ и трубопроводов – затраты на размещение крупногабаритного производства не окупаются единоразовой добычей пары тысяч тонн ПГ, что приводит нас к вопросу о нерентабельности крупнотоннажных заводов на таких участках.

Рано или поздно встает вопрос об интеграции мало- и крупнотоннажных комплексов в единую сеть. В целях повышения уровня оптимизации технологического установок СПГ российские компании активно разрабатывают все новые проекты по обеспечению СПГ как собственных территорий, так и стран-импортеров. В последнее время все больше внимания уделяется новой классификации СПГ-терминала – среднетоннажное производство.

В чем его отличительные особенности перед уже введенными в эксплуатацию заводами? Прежде всего, они с легкостью могут интегрироваться в любую уже существующую систему СПГ, выступать в роли вспомогательной линии для крупнотоннажных проектов или в качестве поставщика повышенных объемов газа на малотоннажные производства [3].

Производственные цепочки среднетоннажного СПГ включают в себя поставку газа из газотранспортной сети или с интегрированного среднего или крупного месторождения газа.

Учитывая собственную мощность заводов средней мощности, они также могут служить вспомогательными линиями поставки газа для малотоннажных СПГ через транспортную желез-

нодорожную и грузовую системы. Был обнаружен любопытный факт использования среднетоннажного завода СПГ для повторного ожижения отпарных газов, насыщенных азотом [4]. Подобная установка была построена в 2014 г. в Малайзии на СПГ заводе в Бинтулу. Для проекта была применена технология Linde LIMUM 3. Мощность установки составляет 650 тыс т/год.

Для удовлетворения экономического спроса на качественный природный газ в России был построен первый СПГ-терминал, действовавший по Соглашению о разделе продукции (далее – СРП). Для осуществления проекта в 1994 г. была создана ООО «Сахалинская энергия» с разделением активов компании между Россией, США, Японией и Великобританией [5]. До 1998 г. строительство и разработка местных рынков переработки и сбыта нефти и газа ложилось целиком и полностью на плечи иностранных инвесторов. Далее, в середине 2000-х, к концерну присоединилось ПАО «Газпром», выкупив у совладельцев контрольный пакет акций. На тот момент поток «Сахалин-2» работал исключительно на перевозку нефти, и только в 2006 г. российские промышленники закончили строительство линии транспортировки СПГ; 29 марта 2009 г. была успешно отгружена партия СПГ иностранным партнерам-импортерам из Японии. Этот момент принято считать вступлением России на мировую арену в гонку экспорта природного газа. В настоящий момент наблюдается внушительный перегруз в работе завода СПГ «Сахалин-2». Ориентировка на потребителей из АТР с все возрастающим спросом на поставки качественного СПГ из России не лучшим образом отражается на загруженности берегового терминала транспортировки СПГ.

Оптимальным решением будет планирование еще одного связующего узла на базе среднетоннажного завода сжижения ПГ в районе газопровода «Сахалин–Хабаровск–Владивосток». Использование новейшей технологии GMR в цикле ожижения ПГ положительным образом скажется на разгрузке центрального терминала поставок в АТР и даст экономический рост и новые рабочие места местному населению.

Априорное ранжирование факторов. Для разработки проектного решения, удовлетворяющего нужды рассматриваемого в работе производства, может быть использовано множество различных методов системного анализа детально рассмотренных в [6]–[8]. В данной работе произведем многомерный корреляционно-регрессион-

ный анализ, который наиболее подходит для решения поставленных целей [9], [10]. Главная суть этого метода заключается в нахождении взаимосвязей между различными факторами технологического процесса (в нашем случае рассматривается функционирование морского порта при заводе СПГ «Сахалин-2») и оценке влияния этих факторов на результат работы системы [11], [12].

Прежде всего, выберем из множества факторов системы функционирования порта те, что имеют наибольшее влияние, по мнению экспертов. Роль экспертов будет отдана пяти должностным лицам из руководящего состава «Сахалин-2».

Целевым показателем, исследованию которого будет посвящена данная работа, является процент загруженности морского порта завода СПГ. В результате опроса экспертов удалось выделить следующие факторы, влияющие на показатель:

1. Количество рабочих дней в месяц – x_1 ;
2. Среднесуточная производительность, в т/день – x_2 ;
3. Плановые простои, дни – x_3 ;
4. Внеплановые простои, дни – x_4 ;
5. Количество работающих технологических линий – x_5 ;
6. Спрос на СПГ, млн т – x_6 ;
7. Время загрузки газозовозов, ч – x_7 ;
8. Температура окружающего воздуха, °C – x_8 .

Далее получим данные ранжирования факторов от экспертов и сведем их в общую таблицу.

Данные обрабатываются следующим образом [13]. Для каждого фактора найдем сумму рангов

$\sum_{j=1}^m a_{ij}$, где m – число опрошенных специалистов,

a_{ij} – ранг i -го фактора, присвоенного j -м экспертом.

Затем вычисляем отклонение Δ суммы рангов от средней суммы рангов для каждого из факторов:

$$\Delta i = \sum_{j=1}^m a_{ij} - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij},$$

где Δi – отклонение суммы рангов i -го фактора от средней суммы рангов; k – число факторов;

$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}$ – средняя сумма рангов.

В табл. 1 приведено ранжирование рангов, в ней присутствуют связанные ранги – т.е. несколько экспертов не смогли однозначно разграничить некоторые из факторов по степени значимости.

Табл. 1. Априорное ранжирование
Tab. 1. A priori ranking

Эксперты	Фактор							
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
1	1	3	2	5	4	8	7	6
2	1.5	1.5	4	5	3	7	6	8
3	3	1	3	3	5	6	8	7
4	2	1	6	4	3	5	8	7
5	3	1	2	5	6	4	7	8
Сумма рангов	10.5	7.5	17	22	21	30	36	36
Отклонение от средней суммы рангов	–12	–15	–5.5	–0.5	–1.5	7.5	13.5	13.5
Квадраты отклонений	144	225	30.25	0.25	2.25	56.25	182.25	182.25

Если имеются связанные ранги, коэффициент конкордации вычисляется по формуле:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12}m^2(k^3 - k) - m \sum_j T_j},$$

где $S = \sum_{i=1}^k \Delta_i^2$; $T_j = \frac{1}{12} \sum_u (t_u^3 - t_u)$; u – число групп, образованных факторами одинакового ранга в j -м ранжировании, а t_u – число одинаковых рангов в u -й группе j -го ранжирования.

Проведем соответствующие вычисления переменных по формулам

$$S = \sum_{i=1}^k \Delta_i^2 = 822.5.$$

Всего у нас две группы, образованные факторами одинакового ранга, число рангов в первой из которых – 2, а во второй – 3 (эксперты 2 и 3 из табл. 1). Соответственно,

$$T_1 = \frac{1}{12}(2^3 - 2) = 0.5,$$

$$T_2 = \frac{1}{12}(3^3 - 3) = 2.$$

Исходя из найденных значений, коэффициент конкордации будет равен

$$W = \frac{822.5}{\frac{1}{12}5^2(8^3 - 8) - 5 \cdot (2 + 0.5)} = 0.792.$$

Учитывая, что коэффициент конкордации близок к 1, можно сделать вывод, что у экспертов высокая согласованность.

Установлено, что при $k > 7$ величина $m(k-1)W$ подчиняется χ^2 -распределению с числом степеней свободы $f = k - 1$.

Значимость коэффициента конкордации устанавливают с помощью критерия Пирсона. Для этого находят расчетное значение χ_p^2 :

$$\chi_p^2 = m(k-1)W = 5(8-1) \cdot 0.792 = 27.74.$$

Расчетное значение сравнивают с табличным из распределения Пирсона, найденным для принятого уровня значимости и числа степеней свободы $f = k - 1$. Гипотеза о наличии согласия мнений опрошенных экспертов принимается, если $\chi_p^2 \geq \chi_t^2$.

В нашем случае, при 5 %-м уровне значимости и числе степеней свободы 7, табличное значение составляет 14.1. Расчетное значение больше табличного, из чего можно сделать вывод, что мнения специалистов согласуются.

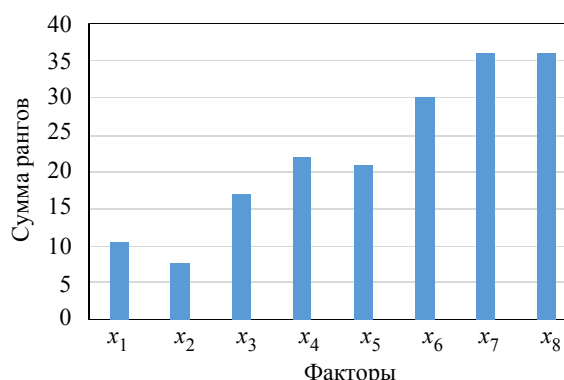


Рис. 1. Гистограмма сумм рангов факторов
Fig. 1. Histogram of sums of factor ranks

Из гистограммы на рис. 1 следует, что наибольшую значимость имеет фактор x_2 , а наименьшую – факторы x_7 и x_8 , что с большей вероятностью можно трактовать как незначительное влияние и исключить из дальнейшего исследования.

Корреляционно-регрессионный анализ факторов производства. Требуется определить фак-

Табл. 2. Исходные данные

Tab. 2. Initial data

Месяц	y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆
1	84.82142857	22	25 000	2	1	2	8
2	85.71428571	20	24 000	3	0	2	7.5
3	84.01360544	23	26 000	2	2	2	8.2
4	80.67226891	21	12 000	4	1	1	6.8
5	94.64285714	22	26 500	2	0	2	9
6	85.71428571	20	25 500	3	1	2	8.5
7	87.24489796	23	27 000	2	2	2	8.7
8	88.21428571	22	26 000	2	1	2	8.3
9	87.5	21	24 500	3	0	2	7.6
10	91.15646259	23	26 800	2	1	2	8.9
11	82.53968254	21	13 000	3	2	1	7
12	98.21428571	22	27 500	2	0	2	9.2

Табл. 3. Исходные данные в общем виде

Tab. 3. Initial data in general form

Месяц	y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆
1	0.080748	0.084615	0.08809	0.066667	0.090909	0.090909	0.081883
2	0.081598	0.076923	0.084567	0.1	0	0.090909	0.076766
3	0.079979	0.088462	0.091614	0.066667	0.181818	0.090909	0.08393
4	0.076798	0.080769	0.042283	0.133333	0.090909	0.045455	0.069601
5	0.090098	0.084615	0.093376	0.066667	0	0.090909	0.092119
6	0.081598	0.076923	0.089852	0.1	0.090909	0.090909	0.087001
7	0.083055	0.088462	0.095137	0.066667	0.181818	0.090909	0.089048
8	0.083978	0.084615	0.091614	0.066667	0.090909	0.090909	0.084954
9	0.083298	0.080769	0.086328	0.1	0	0.090909	0.077789
10	0.086779	0.088462	0.094433	0.066667	0.090909	0.090909	0.091095
11	0.078576	0.080769	0.045807	0.1	0.181818	0.045455	0.071648
12	0.093497	0.084615	0.096899	0.066667	0	0.090909	0.094166

торы, которые в большей степени влияют на коэффициент загрузки завода СПГ, имея в распоряжении данные за 12 мес. (табл. 2) по коэффициенту и факторы, предположительно влияющие на эту величину.

Формула для расчета коэффициента такова:

$$\frac{\text{ФП}}{\text{МВП}} \cdot 100 \%,$$

где ФП – фактическое производство, $\text{ФП} = x_2(x_1 - x_3 - x_4)$; максимально возможное производство $\text{МВП} = x_5 \text{Пр}_{\max} \text{линий} \cdot (x_1 - x_3)$.

Максимальную производительность ($\text{Пр}_{\max}$) одной линий примем равную 14 000 т/сут.

В табл. 2 y – коэффициент загрузки терминала, %.

Для проведения анализа необходимо, чтобы данные были приведены к стандартизированному

виду, поэтому поделим каждое значение в табл. 2 на сумму столбца, в котором оно находится, и получим табл. 3.

С помощью встроенного в MS Excel пакета «Анализ данных» определим необходимые параметры с помощью функции «Регрессия» (табл. 4–6).

Табл. 4. Регрессионная статистика

Tab. 4. Regression statistics

Параметр	Результат
Множественный R	0.997660912
R-квадрат	0.995327296
Нормированный R-квадрат	0.989720051
Стандартная ошибка	0.000840077
Наблюдения	12

Табл. 5. Показатели дисперсионного анализа

Tab. 5. Indicators of variance analysis

Показатель	df*	SS**	MS***	F****	Значимость F
Регрессия	6	0.000249566	4.15944E-05	177.5073675	1.16753E-05
Остаток	5	1.17162E-06	2.34325E-07	–	–
Итого	11	0.000250738	–	–	–

* df – количество степеней свободы; ** SS – сумма квадратов;

*** MS – среднее квадратичная ошибка; **** F – критерий Фишера

Табл. 6. Коэффициенты дисперсионного анализа
 Tab. 6. Coefficients of variance analysis

Коэффициент		Стандартная ошибка	<i>t</i> -статистика	<i>P</i> -значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %
Переменная	Значение					
<i>y</i>	0.11157907	0.019207043	10.9315759	0.000111357	−0.08534103	0.137817111
<i>x</i> ₁	−0.133374011	0.069735675	−1.912564987	0.114010551	−0.312652371	0.045887249
<i>x</i> ₂	1.183424131	0.174287115	6.790067705	0.001054283	0.735402019	1.631404602
<i>x</i> ₃	−0.047344645	0.017015623	−2.784220074	0.038790796	−0.091084696	−0.003046594
<i>x</i> ₄	−0.0485941	0.028636463	−1.670399626	1.29964E−06	−0.05554867	−0.04123333
<i>x</i> ₅	−1.121490171	0.146000808	−7.677229326	0.000595794	−1.497000942	−0.745799041
<i>x</i> ₆	−0.171567227	0.100379413	−1.70918739	0.148112142	−0.429600724	0.086466269

где *t*-критерий Стьюдента. *P*-значение – это вероятность истинности нулевой гипотезы, которая гласит, что независимые переменные (переменные *x_i* в столбце «Показатели» табл. 2) не объясняют динамику зависимой переменной *y*. Столбцы «Нижние 95 %» и «Верхние 95 %» представляют собой границы доверительных интервалов, в которых лежат предполагаемые значения коэффициентов с вероятностью в 95 %.

Столбец «Коэффициенты» (табл. 6) содержит показатели линейной зависимости целевого параметра (ОЧИ) от *x_i*, на основании данных расчетов получаем уравнение множественной регрессии:

$$y = 0.1 - 0.13x_1 + 1.18x_2 - 0.047x_3 - 0.05x_4 - 1.12x_5 - 0.17x_6. \quad (1)$$

Данное уравнение отражает в себе общую тенденцию выработки. С его помощью можно определить среднее значение результативного признака при тех или иных значениях факторных признаков.

Наибольшее влияние на коэффициент загрузки терминала оказывают: количество работающих линий (−1.12), работа технологических линий в полном составе в среднем снижает коэффициент загрузки на 1.12 %; среднесуточная производительность (1.18), большая выработка газа в день ведет к повышению коэффициента загрузки на 1.18 %.

Для оценки надежности уравнения регрессии используем *F*-критерий Фишера (столбец *F* в табл. 5). Табличное значение при 12 наблюдениях и 6 факторах равно 4.95 [14], полученное значение равно 177.5 (табл. 5, ст. *F*), следовательно, $4.95 < 177.5$. Это значит, что уравнение статистически значимо. Значимость *F* меньше 0.05.

В результате регрессионного анализа *R*-квадрат равен 0.995, а значит, модель объясняет примерно 99 % вариации коэффициента загрузки терминала, что указывает на высокую точность модели.

Также необходимо выполнить оценку качества уравнения регрессии (1), для этого найдем среднюю ошибку аппроксимации по формуле

$$A_{cp} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - y_x}{y_i} \right| \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где *y_i* – исходные данные коэффициента загрузки терминала по годам; *y_x* – прогнозное значение *y* по полученному уравнению (1); *n* – количество измерений.

В данном случае ошибка аппроксимации покажет, насколько сильно различаются между собой исходные значения коэффициента загрузки терминала и значения, вычисленные при помощи коэффициентов регрессионного уравнения. Естественно, чем этот показатель меньше, тем более удовлетворительной можно будет считать модель. Результаты представлены в табл. 7.

Табл. 7. Оценка качества уравнения
 Tab. 7. Estimation the quality of the equation

<i>y_i</i>	<i>y_x</i>	<i>d</i>
0.078783	0.097715	−0.24030565
0.088067	0.065975	0.250854463
0.093219	0.093017	0.00216694
0.085089	0.096235	−0.130992255
0.073933	0.071476	0.033232792
0.080362	0.022645	0.718212588
0.086668	0.075678	0.126805741
0.091395	0.087398	0.043733246
0.083198	0.073226	0.11985865
0.076485	0.077159	−0.008812185
0.080362	0.117307	−0.459732212
0.082441	0.064669	0.215572349
Сумма		0.670594468
<i>A_{cp}</i>		5.58828723

В табл. 7 *A_{cp}* – средняя ошибка аппроксимации, вычисляемая по формуле (2), $d = \left| \frac{y_i - y_x}{y_i} \right|$. *A_{cp}* = 5.59 %, что показывает, что модель удовлетворительна.

	y	x1	x2	x3	x4	x5	x6
y	1						
x1	0,32087	1					
x2	0,65036	0,41307	1				
x3	-0,60256	-0,75394	-0,78439	1			
x4	-0,56545	0,39173	-0,27734	-0,08502	1		
x5	0,55243	0,29019	0,98048	-0,69282	-0,34362	1	
x6	0,82782	0,53796	0,85043	-0,80165	-0,18444	0,74153	1

Рис. 2. Корреляционный анализ в Excel

Fig. 2. Correlation analysis in Excel

Теперь проведем корреляционный анализ (рис. 2), чтобы определить зависимости между изучаемыми факторами. Это можно сделать также с помощью пакета «Анализ данных», только функцией «Корреляция».

Из данного анализа ясно видно, что наибольшее влияние имеет фактор месячного спроса на СПГ (x_6), а наименьшее – количество запланированных дней простоя (x_3). Фактор x_2 сильно коррелирует с факторами x_5 и x_6 , поэтому им можно пренебречь во избежание слишком сильной корреляции коэффициентов.

Положительная корреляция наблюдается в связи с среднесуточной производительностью, количеством работающих линий и спросом на СПГ.

Отрицательная корреляция с факторами внеплановых и плановых простоев x_1 почти не коррелирует с y (0.32).

Табл. 8. Регрессионная статистика

Tab. 8. Regression statistics

Параметр	Результат
Множественный R	0.975827993
R-квадрат	0.952240273
Нормированный R-квадрат	0.9124405
Стандартная ошибка	0.001412749
Наблюдения	12

Табл. 9. Показатели дисперсионного анализа

Tab. 9. Indicators of variance analysis

Показатель	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	5	0.000238763	4.77525E-05	23.9257716	0.000676873
Остаток	6	1.19752E-05	1.99586E-06	–	–
Итого	11	0.000250738	–	–	–

Табл. 10. Коэффициенты дисперсионного анализа

Tab. 10. Coefficients of variance analysis

Коэффициенты		Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %
Переменная	Значение					
y	0.063374552	0.021043419	2.969054555	0.025251681	-0.011002271	0.115746832
x_1	0.025751151	0.019685589	1.307434059	0.297563227	-0.443286588	0.49478889
x_2	-0.076171336	0.04808176	-1.583960115	0.164923333	-0.193841309	0.041498638
x_3	-0.041683821	0.007804903	-5.335962481	0.001670219	-0.061048367	-0.022672975
x_4	-0.134895637	0.044001591	-3.065142796	0.022078867	-0.242583031	-0.027208243
x_5	0.466685025	0.10277844	4.540292151	0.003932031	0.21517321	0.718196839

Проведем повторную регрессию факторов без влияния x_2 с помощью встроенного инструмента MS Excel «Анализ данных» (табл. 8–10).

Получим уравнение множественной регрессии

$$y = 0.06 + 0.025x_1 - 0.07x_2 - 0.041x_3 - 0.134x_4 + 0.46x_5. \quad (3)$$

Данное уравнение отражает в себе общую тенденцию выработки. С его помощью можно определить среднее значение результативного признака при тех или иных значениях факторных признаков.

Для оценки надежности уравнения регрессии используем F-критерий Фишера. Табличное значение при 12 наблюдениях и 6 факторах равно 4.95 [14], полученное значение F равно 23.9 (табл. 9, ст. F) следовательно $4.95 < 23.9$. Это значит, что уравнение является статистически значимым. Значимость F меньше 0.05.

R-квадрат в результате регрессионного анализа равен 0.95, а значит модель объясняет примерно 95 % вариации коэффициента загруженности, что указывает на высокую точность модели.

Также необходимо выполнить оценку качества уравнения регрессии (3) по формуле (2), результаты которой приведены в табл. 11.

Табл. 11. Оценка качества уравнения
Tab. 11. Estimation the quality of the equation

y_i	y_x	d
0.080748	0.0828521	-0.0260597
0.081598	0.0937216	-0.1485798
0.079979	0.07051978	0.11826912
0.076798	0.06232001	0.18851982
0.090098	0.09466394	-0.0506823
0.081598	0.0811698	0.00524538
0.083055	0.07027313	0.15389557
0.083978	0.08260545	0.01634123
0.083298	0.09369443	-0.1248132
0.086779	0.08250428	0.04925573
0.078576	0.0512582	0.3476581
0.093497	0.09441729	-0.0098376
Сумма		0.51921225
A_{cp}^*		4.32676875

* A_{cp} = 4.32 %, т. е. модель удовлетворительна

Был выполнен многомерный корреляционно-регрессионный анализ и построена прогнозная модель с целью определения взаимосвязи случайных величин.

Имитационное моделирование. Построение имитационной модели. Для построения имитационной модели был выбран процесс загрузки газове́за при прибытии морского судна в порт, так как его можно рассматривать в качестве системы массового обслуживания.

В морском порту имеется два канала обслуживания – два трубопровода, которые непосредственно участвуют в процессе загрузки СПГ на перевозочное судно. Максимальная длина очереди – 3, так как в собственности условного морского порта находится 2 технологические линии,

осуществляющие подачу СПГ, и еще один дополнительный причал для обдувки и подготовки внутренних хранилищ газове́за.

Время работы системы массового обслуживания (СМО) было выбрано 31 680 ч, или целый месяц, состоящий из 22 полных рабочих дней. Отчет о работе СМО представлен на рис. 3.

Интенсивность поступления заявок $\lambda = 4$, т. е. на предприятие поступает 4 заявки в день. В моделируемой системе используется равномерное распределение поступления заявок, потому что в среднем газове́зы прибывают в порт каждые два дня.

Таким образом, $T_{\text{раб}} = 1$ мес. или 22 р. д.; $\lambda = 4$ ед./р. д.; $p = 2$ ед. – число обслуживающих каналов, в данном случае – технологических линий; $l = 3$ ед. – максимальная длина очереди; $\bar{t}_{\text{об}} = 16$ ч – среднее время обслуживания.

Оценка показателей эффективности. Теперь рассчитаем некоторые параметры получившейся системы, исходя из данных по отчету СМО (рис. 3).

1. Абсолютная пропускная способность: $0.93 \cdot 4 = 3.72$ ед./р. д.

2. Относительная пропускная способность: $1 - 0.07 = 0.93$ ед./р. д.

3. Среднее число занятых каналов: 1.986.

4. Коэффициент занятости: 0.993.

5. Вероятность отказа в обслуживании: $\frac{69 - 64}{69} = 0.07$.

6. Средняя длина очереди: 2.754 ед.

7. Среднее время ожидания: 1264.665 (21 ч).

LABEL	LOC	BLOCK	TYPE	ENTRY	COUNT	CURRENT	COUNT	RETRY
	1	GENERATE		246		0	0	
	2	TEST		246		0	0	
	3	QUEUE		69		3	0	
	4	ENTER		66		0	0	
	5	DEPART		66		0	0	
	6	ADVANCE		66		2	0	
	7	LEAVE		64		0	0	
OUT	8	TERMINATE		241		0	0	
	9	GENERATE		1		0	0	
	10	TERMINATE		1		0	0	
QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE. (-0)	RETRY
OCHER	3	3	69	2	2.754	1264.665	1302.417	0
STORAGE	CAP.	REM.	MIN.	MAX.	ENTRIES	AVL.	AVE.C.	UTIL.
NNT	2	0	0	2	66	1	1.986	0.993
	RETRY	DELAY						
	0	3						

Рис. 3. Отчет о работе СМО

Fig. 3. Report on the work of the mass service system

Исходя из параметров данной системы, модель находится в режиме перегрузки. Она имеет довольно низкое количество отказов в обслуживании (7 %), но очень высокий коэффициент занятости причала и технологических линий.

Полный факторный план эксперимента. Планирование эксперимента – это процесс выбора необходимых и достаточных условий для проведения опытов, которые помогут решить поставленную задачу с нужной точностью. Цель планирования эксперимента заключается в том, чтобы найти такие условия и правила проведения опытов, которые позволят получить надежную и достоверную информацию об объекте с минимальными затратами усилий, а также представить эту информацию в удобной форме с количественной оценкой точности.

За x_1 был взят параметр λ – интенсивность потока заявок, $x_2 - p$, $x_3 - l$, $x_4 - \bar{t}_{об}$ (среднее время обслуживания). За выходной параметр $\hat{y}$ обозначено количество обслуженных газозовозов. Здесь p – число обслуживающих каналов, в данном случае – технологических линий, а l – максимальная длина очереди.

Функция отклика

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4,$$

где b_j – коэффициенты регрессионной модели, $j = 0, 1, 2, 3, 4$.

Рассмотрим полный факторный эксперимент на примере линейной модели. Для проведения полного факторного эксперимента нужно 2^k опытов, где 2 – число уровней, которого достаточно для построения линейной модели, а k – количество факторов.

Табл. 12. Матрица планирования эксперимента
Tab. 12. Experiment planning matrix

Номер варианта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
1	+	–	–	–	–
2	+	–	–	–	+
3	+	–	–	+	–
4	+	–	–	+	+
5	+	–	+	–	–
6	+	–	+	–	+
7	+	–	+	+	–
8	+	–	+	+	+
9	+	+	–	–	–
10	+	+	–	–	+
11	+	+	–	+	–
12	+	+	–	+	+
13	+	+	+	–	–
14	+	+	+	–	+
15	+	+	+	+	–
16	+	+	+	+	+

Табл. 13. Матрица планирования с учетом эффекта взаимодействия
Tab. 13. Planning matrix taking into account the interaction effect

Номер варианта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	$\bar{y}$
1	+	–	–	–	–	0.536	0.316	0.34	0.109	0.192	0.299
2	+	–	–	–	+	0.892	0.726	0.664	0.495	0.667	0.689
3	+	–	–	+	–	0.652	0.71	0.652	0.465	0.447	0.585
4	+	–	–	+	+	1.392	1.328	1.224	1.094	0.767	1.161
5	+	–	+	–	–	0.062	0.083	0.044	0.023	0.063	0.055
6	+	–	+	–	+	0.429	0.238	0.167	0.043	0.112	0.198
7	+	–	+	+	–	0.062	0.083	0.096	0.023	0.102	0.073
8	+	–	+	+	+	0.658	0.454	0.376	0.176	0.301	0.393
9	+	+	–	–	–	0.396	0.302	0.465	0.275	0.453	0.378
10	+	+	–	–	+	0.75	0.69	0.87	0.752	0.717	0.756
11	+	+	–	+	–	0.608	0.807	0.965	0.534	0.835	0.75
12	+	+	–	+	+	1.179	1.401	1.605	1.073	1.351	1.322
13	+	+	+	–	–	0.129	0.103	0.093	0.076	0.097	0.1
14	+	+	+	–	+	0.543	0.243	0.35	0.256	0.277	0.334
15	+	+	+	+	–	0.262	0.209	0.204	0.098	0.283	0.211
16	+	+	+	+	+	0.585	0.473	0.739	0.614	0.616	0.605

Для получения y_i была проведена работа с имитационной моделью, а именно – проварьированы факторы x_1 и $x_4 \pm 25\%$ к исходному значению, x_2 и $x_3 \pm 1$.

Далее представлены варианты проведения эксперимента (табл. 12). Испытания проведены 5 раз при одном режиме. Результаты представлены в табл. 13 ($M = 5$ – количество испытаний; $N = 2^4 = 16$).

Необходимо найти коэффициенты регрессионной модели b_j по формуле

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} \bar{y}_j : \quad (4)$$

$$b_0 = 0.49; b_1 = 0.06; b_2 = -0.25; b_3 = 0.14; b_4 = 0.19.$$

Тогда

$$\hat{y}_i = 0.49 + 0.06x_1 - 0.25x_2 + 0.14x_3 + 0.19x_4.$$

Получено, что x_2 – наиболее значимый фактор, а x_1 – незначительный фактор. Этот вывод был сделан по найденным коэффициентам b_j . Наиболее значимый фактор – тот, у которого коэффициент по модулю больше остальных; соответственно, незначительный – чей коэффициент по модулю меньше остальных.

Далее были вычислены значения времени выполнения безошибочной работы.

Также вычислена дисперсия S_i^2 по формуле

$$S_i^2 = \frac{\sum_{m=1}^M (y_{im} - \hat{y}_i)^2}{M - 1}.$$

Для проверки воспроизводимости (стабильности испытаний) был рассчитан критерий Кохрена:

$$G_p = S_{i \max}^2 / \sum_{i=1}^N S_i^2 = 0.180. \quad (5)$$

Так как $0.180 < 0.276$ (табличный коэффициент Стьюдента, $G_{\text{табл}} = 0.276$), то измерения в эксперименте считаются воспроизводимыми.

Затем была проведена проверка значимости факторов, для чего рассчитана дисперсия воспроизводимости эксперимента S_y^2 по формуле

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} = 0.03. \quad (6)$$

Далее было рассчитано среднеквадратичное отклонение коэффициентов регрессии S_{bj} по формуле

$$S_{bj} = \sqrt{\frac{S_y^2}{NM}} = 0.02. \quad (7)$$

Для вычисления t -критерия Стьюдента t_{pj} использовалась формула

$$t_{pj} = \frac{|b_j|}{S_{bj}}. \quad (8)$$

Например,

$$t_{p1} = 3.18; t_{p2} = 12.61; t_{p3} = 7.28;$$

$$t_{p4} = 9.55; t_{\text{табл}} = 2.12,$$

где $t_{\text{табл}}$ – табличный t -критерий Стьюдента.

Поскольку все расчетные значения больше табличного критерия Стьюдента, то все факторы значимы.

Для проверки адекватности модели было рассчитано значение дисперсии адекватности модели $S_{\text{ад}}^2$ по формуле

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{M \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{N - (k + 1)}, \quad (9)$$

где k – количество факторов, у которых критерий Стьюдента больше критического, т. е. $k = 2$,

$$S_{\text{ад}}^2 = 0.059;$$

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_y^2} = 1.90,$$

где F_p – расчетное значение F -критерия Фишера.

Для определения $F_{\text{табл}}$ – табличного значения F -критерия Фишера вычислены ϑ_1 – число степеней свободы, соответствующее числителю дисперсии адекватности модели $\vartheta_1 = N - (k + 1) = 16 - (4 + 1) = 11$ и ϑ_2 – число степеней свободы, соответствующее знаменателю (дисперсии воспроизводимости) $\vartheta_2 = N(M - 1) = 16 \cdot (5 - 1) = 64$, следовательно $F_{\text{табл}} = 1.92$ [14].

Так как $F_p < F_{\text{табл}}$, можно утверждать, что модель адекватна.

Табл. 14. Матрица планирования с учетом эффекта взаимодействия
Tab. 14. Planning matrix taking into account the interaction effect

Номер варианта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	$\bar{y}$
1	+	–	–	–	–	0.816	0.613	1.223	0.707	0.439	0.76
2	+	–	–	–	+	1.187	1.341	1.234	1.02	1.144	1.185
3	+	–	–	+	–	1.969	2.33	1.955	1.063	1.148	1.693
4	+	–	–	+	+	2.183	2.847	2.724	2.188	1.934	2.375
5	+	–	+	–	–	0.102	0.286	0.137	0.063	0.19	0.156
6	+	–	+	–	+	0.622	0.714	0.177	0.368	0.287	0.434
7	+	–	+	+	–	0.202	0.286	0.238	0.063	0.319	0.222
8	+	–	+	+	+	1.658	1.492	1.183	0.479	0.259	1.014
9	+	+	–	–	–	1.132	0.906	1.261	1.072	1.23	1.12
10	+	+	–	–	+	1.592	1.679	1.491	1.503	1.428	1.539
11	+	+	–	+	–	2.239	2.75	2.995	2.623	2.504	2.622
12	+	+	–	+	+	3.069	3.203	3.311	3.137	2.602	3.064
13	+	+	+	–	–	0.773	0.428	0.213	0.239	0.43	0.417
14	+	+	+	–	+	0.599	0.8	1.301	0.878	0.871	0.89
15	+	+	+	+	–	1.312	0.926	1.262	0.45	1.373	1.065
16	+	+	+	+	+	1.59	1.691	2.632	2.367	2.012	2.058

Проведем вычислительный эксперимент для средней длины очереди.

Испытания проведены 5 раз при одном режиме, $N = 2^4 = 16$. Результаты представлены в табл. 14.

Необходимо найти коэффициенты регрессионной модели b_j по уравнению (4):

$$b_0 = 1.29; b_1 = 0.31; b_2 = -0.51; b_3 = 0.48; b_4 = 0.28.$$

Тогда

$$\hat{y}_i = 1.29 + 0.31x_1 - 0.51x_2 + 0.48x_3 + 0.28x_4.$$

Получается, что x_2 – наиболее значимый фактор, а x_4 – незначительный. Этот вывод был сделан по найденным коэффициентам b_j . Наиболее значимый фактор – фактор, у которого коэффициент по модулю меньше остальных, соответственно незначительный – коэффициент по модулю больше остальных. Далее были вычислены значения времени выполнения безошибочной работы. Для проверки воспроизводимости (стабильности испытаний) был рассчитан критерий Кохрена по формуле (5)

$$G_p = 0.156.$$

Так как $0.156 < 0.276$ ($G_{\text{табл}} = 0.276$), измерения в эксперименте считаются воспроизводимыми.

Затем была проведена проверка значимости факторов. Для этого рассчитано значение S_y^2 по формуле (6)

$$S_y^2 = 0.18.$$

Далее произведен расчет S_{bj} по формуле (7)

$$S_{bj} = 0.05.$$

Для вычисления t -критерия Стьюдента t_{pj} использовалась формула (8)

$$t_{p1} = 6.58; t_{p2} = 10.80; t_{p3} = 10.15;$$

$$t_{p4} = 6,00; t_{\text{табл}} = 2.12.$$

Так как все расчетные значения больше табличного критерия Стьюдента, то значимы все факторы.

Для проверки адекватности модели было рассчитано значение дисперсии ее адекватности $S_{\text{ад}}^2$ по формуле (9)

$$S_{\text{ад}}^2 = 0.059,$$

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_y^2} = 1.90.$$

Для определения $F_{\text{табл}}$ вычислены $\vartheta_1 = N - (k + 1) = 16 - (3 + 1) = 12$ и $\vartheta_2 = N(M - 1) = 16 \cdot (5 - 1) = 64$, следовательно, $F_{\text{табл}} = 1.92$.

Так как $F_p < F_{\text{табл}}$, то можно утверждать, что модель адекватна.

После проведения статистического анализа были построены факторные модели для средней длины очереди и среднего времени ожидания:

$$\hat{y}_{\text{СДО}} = 1.29 + 0.31x_1 - 0.51x_2 + 0.48x_3 + 0.28x_4,$$

$$\hat{y}_{\text{СВО}} = 0.49 + 0.06x_1 - 0.25x_2 + 0.14x_3 + 0.19x_4.$$

Также все модели были проверены на стабильность испытаний, значимость факторов и адекватность модели.

Все модели стабильны.

В обеих моделях все критерии значимы.

Все модели адекватны.

Построенная в GPSS World модель порта «Сахалин-2» выявила две серьезные проблемы: перегруженный режим работы и высокий процент отказа в обслуживании (7 % каждый месяц).

Обсуждение результатов. В данной статье был проведен анализ состояния морского порта «Сахалин-2», применен метод экспертных оценок для отбора подходящих параметров. Впоследствии на основе 6 факторов, влияющих на коэффициент загрузки морского терминала, был проведен анализ регрессии и корреляции. Наиболее важным параметром функционирования морского порта служит спрос на СПГ, поступающий как от стран-импортеров, так и от внутреннего рынка газа.

Построенная в GPSS World модель порта «Сахалин-2» выявила две серьезные проблемы: перегруженный режим работы и высокий процент отказа в обслуживании (7 % каждый месяц).

Данные цифры в рамках транспортной системы можно интерпретировать как выход производственных мощностей завода за рамки дедлайнов, задержки морских рейсов или даже неполная загрузка газозовов необходимым количеством сырья. Подобные отказы в обслуживании негативным образом сказываются на экономических показателях завода и постепенно приведут к убыточности предприятия, так как издержки производства СПГ только по данным на 2022 г. составляют несколько миллионов долларов.

Выводы. На основе полученных данных было предложено оптимизационное решение о постройке еще одного СПГ завода средней мощности для поддержания баланса и стабильности дальневосточного торгового узла.

Согласно оценке технической эффективности, данное решение не только снизит нагрузку на транспортную линию «Сахалин-2», но и уменьшит число отказов в обслуживании. Впоследствии возможна разработка нового технологического решения о навигационной системе Тихоокеанского региона, моделирующей оптимальные маршруты между двумя основными морскими портами.

Список литературы

1. Попова Е. В., Шевченко О. В., Покидова В. В. Влияние санкций на СПГ индустрию в России и перспективы ее долгосрочного развития // Совр. социальные и экон. процессы: проблемы, тенденции, перспективы регионального развития. 2023. № 1. С. 55–57.
2. Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы // II Всерос. науч.-практ. конф.: тезисы докладов / отв. ред. Федорова Е. Б. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2023.
3. Российские СПГ проекты: история, современность, перспективы / В. И. Татаренко, Б. В. Робинсон, О. П. Ляпина, О. В. Усикова // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 1, № 3. С. 61–74.
4. Экспорт газа из России: структура и динамика поставок / Л. В. Эдер, И. В. Филимонова, А. В. Комарова, В. Ю. Немов, С. И. Шумилова // Газовая промышленность. 2019. № 1 (779). С. 86–92.
5. Голубева И. А., Мещерин И. В., Дубровина Е. П. Производство сжиженного природного газа: вчера, сегодня, завтра // Мир нефтепродуктов. 2016. № 6. С. 4–13.
6. Экспериментальное исследование ЭМП электролизера Содерберга с помощью информационной системы мониторинга / Е. А. Боронко, Ю. В. Ильюшин, А. Н. Ильюшина, О. А. Беляевский, К. В. Мартиросян // Совр. наука и инновации. 2024. № 3. С. 9–19. doi: 10.37493/2307-910X.2024.3.1.
7. Ильюшин Ю. В. Методы импульсного управления объектами с распределенными параметрами: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)»: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2012. 170 с.
8. Ильюшин Ю. В. Разработка системы управления технологическим процессом добычи высокопарафинистой нефти: специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)»: дис. ... д-р техн. наук. СПб., 2021. 275 с.
9. Афанасьева, О. В. Перспективы использования мультиагентных систем при моделировании и исследовании процессов в высокотехнологичном производстве // Сб. тез. докл. IV Междунар. форума: в 2 ч. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2024. С. 22–24.
10. Афанасьева О. В., Лимонов А. И. Применение многомерного корреляционно-регрессионного анализа для исследования качества воды с использованием специального программного обеспечения // Сб. тез. докл. IV Междунар. форума: в 2 ч. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2024. С. 3–6.
11. Моделирование системы магнитного охлаждения и синтез регулятора ее холодопроизводительности / И. М. Новожилов, А. В. Мартиросян, Д. А. Первухин, В. Я. Трофимец, Д. Л. Тукаев, Я. С. Степунин,

Ю. М. Искандеров // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024, Т. 17, № 5. С. 40–52. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-40-52.

12. Мартиросян К. В., Чернышев А. Б., Мартиросян А. В. Применение сетей Байеса при проектировании информационной системы «Месторождения минеральных вод» // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. 2023. Т. 1. С. 318–321.

13. Хамитов Р. М., Морин С. В. Применение методов экспертных оценок при выборе средств технического контроля // Компетентность. 2022. № 6. С. 16–21.

14. Таблица распределения Фишера Снедекора. URL: <https://bigbaz.ru/tablica/tablitisa-raspredeleniya-fishe-ra-snedekora> (дата обращения: 08.06.2025).

Информация об авторах

Посохова Екатерина Викторовна – студент группы СИСТ-24. Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.
E-mail: katerina_fadeeva_97@mail.ru

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: novozhilovim@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Мальцев Павел Александрович – аспирант кафедры системного анализа и управления. Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.
E-mail: maltcev-pave@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-6431-3512>

Кухарова Татьяна Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры системного анализа и управления. Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.
E-mail: Kukharova_TV@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5359-6763>

Плотников Артем Викторович – зав. лаборатории системного анализа и управления. Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.
E-mail: arpvitarlaeda@gmail.com

Подкина Мария Евгеньевна – секретарь кафедры системного анализа и управления. Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.
E-mail: m.losckaya@yandex.ru

Вклад авторов:

Посохова Е. В. – литературный обзор, регрессионный анализ.

Мальцев П. А. – регрессионный анализ, проверка результатов.

Новожилов И. М. – общее руководство.

Кухарова Т. В. – методология исследования, проверка результатов.

Плотников А. В. – введение, обсуждение, заключение.

Подкина М. Е. – введение, обсуждение, заключение.

References

1. Popova E. V., Shevchenko O. V., Pokidova V. V. Vliyanie sankcij na SPG industriju v Rossii i perspektivy ee dolgosrochnogo razvitiya // Sovr. social'nye i jekon. processy: problemy, tendencii, perspektivy regional'nogo razvitiya. 2023. № 1. S. 55–57. (In Russ.).

2. Szchizhennyj prirodnyj gaz: problemy i perspektivy // II Vseros. nauch.-prakt. konf.: tezisy dokladov / otv.

red. Fedorova E. B. M.: RGU nefti i gaza (NIU) im. I. M. Gubkina, 2023. (In Russ.).

3. Rossijskie SPG proekty: istorija, sovremennost', perspektivy / V. I. Tatarenko, B. V. Robinson, O. P. Ljapina, O. V. Usikova // Interjekspo Geo-Sibir'. 2018. Т. 1, № 3. S. 61–74. (In Russ.).

4. Jeksport gaza iz Rossii: struktura i dinamika postavok / L. V. Jeder, I. V. Filimonova, A. V. Komarova, V. Ju. Nemov,

S. I. Shumilova // *Gazovaja promyshlennost'*. 2019. № 1 (779). S. 86–92. (In Russ.).

5. Golubeva I. A., Meshherin I. V., Dubrovina E. P. *Proizvodstvo szhizhennogo prirodnogo gaza: vchera, segodnja, zavtra* // *Mir nefteproduktov*. 2016. № 6. S. 4–13. (In Russ.).

6. Jeksperimental'noe issledovanie JeMP jelektrolizera Soderberga s pomoshh'ju informacionnoj sistemy monitoringa / E. A. Boronko, Ju. V. Il'jushin, A. N. Il'jushina, O. A. Beljaevskij, K. V. Martirosjan // *Sovr. nauka i innovacii*. 2024. № 3. S. 9–19. doi: 10.37493/2307-910X.2024.3.1. (In Russ.).

7. Il'jushin Ju. V. *Metody impul'snogo upravlenija ob#ektami s raspredelennymi parametrami: special'nost' 05.13.01 «Sistemnyj analiz, upravlenie i obrabotka informacii (po otrasljam)»: dis. ... kand. tehn. nauk. Pjatingorsk, 2012. 170 s.* (In Russ.).

8. Il'jushin Ju. V. *Razrabotka sistemy upravlenija tehnologicheskim processom dobychi vysokoparafinistoj nefti: special'nost' 05.13.06 «Avtomatizacija i upravlenie tehnologicheskimi processami i proizvodstvami (po otrasljam)»: dis. ... d-ra tehn. nauk. SPb., 2021. 275 s.* (In Russ.).

9. Afanas'eva O. V. *Perspektivy ispol'zovanija mul'ti-agentnyh sistem pri modelirovanii i issledovanii processov v vysokotehnologichnom proizvodstve* // *Sb. tez. dokl. IV Mezhdunar. foruma: v 2 ch. Sankt-Peterburg:*

Sankt-Peterburgskij gos. un-t ajerokosmicheskogo priborostroenija, 2024. S. 22–24. (In Russ.).

10. Afanas'eva O. V., Limonov A. I. *Primenenie mnogomernogo korreljacionno-regressionnogo analiza dlja issledovanija kachestva vody s ispol'zovaniem special'nogo programmno obespechenija* // *Sb. tez. dokl. IV Mezhdunar. foruma: v 2 ch. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gos. un-t ajerokosmicheskogo priborostroenija, 2024. S. 3–6.* (In Russ.).

11. *Modelirovanie sistemy magnitnogo ohlazhdenija i sintez reguljatora ee holodoproizvoditel'nosti* / I. M. Novozhilov, A. V. Martirosjan, D. A. Pervuhin, V. Ja. Trofimec, D. L. Tukeev, Ja. S. Stepuhin, Ju. M. Iskanderov // *Izv. SPbGJeTU «LJeTI»*. 2024. T. 17, № 5. S. 40–52. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-40-52. (In Russ.).

12. Martirosjan K. V., Chernyshev A. B., Martirosjan A. V. *Primenenie setej Bajesa pri proektirovanii informacionnoj sistemy «Mestorozhdenija mineral'nyh vod»* // *Mezhdunar. konf. po mjagkim vychislenijam i izmerenijam*. 2023. T. 1. S. 318–321. (In Russ.).

13. Hamitov R. M., Morin S. V. *Primenenie metodov jekspertnyh ocenok pri vybore sredstv tehničeskogo kontrolja* // *Kompetentnost'*. 2022. № 6. S. 16–21. (In Russ.).

14. *Tablica raspredelenija Fishera Snedekora*. URL: <https://bigbaz.ru/tablica/tablitza-raspredeleniya-fishera-snedekora> (data obrashhenija: 08.06.2025). (In Russ.).

Information about the authors

Ekaterina V. Posokhova – student of the Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21 line, 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: katerina_fadeeva_97@mail.ru

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Pavel A. Maltsev – postgraduate student at the Department of System Analysis and Management of the Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21 line, 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: maltcev-pave@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-6431-3512>

Tatyana V. Kukharova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Systems Analysis and Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21 line, 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: Kukharova_TV@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5359-6763>

Artem V. Plotnikov – head of the laboratory of System Analysis and Management of Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21 line 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: apvitarlaeda@gmail.com

Maria E. Podkina – secretary of the Department of System Analysis and Management of Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21 line, 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: m.losckaya@yandex.ru

Contribution of the authors:

Posokhova E. V. – literature review, regression analysis.

Maltsev P. A. – regression analysis, verification of results.

Novozhilov I. M. – general management.

Kukharova T. V. – research methodology, verification of results.

Plotnikov A. V. – introduction, discussion, conclusion.

Podkina M. E. – introduction, discussion, conclusion.

Статья поступила в редакцию 22.03.2025; принята к публикации после рецензирования 09.06.2025; опубликована онлайн 29.09.2025.

Submitted 22.03.2025; accepted 09.06.2025; published online 29.09.2025.
