

УДК 681.58

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-164-183>

Математическое моделирование работы технологической линии многофункциональной установки подготовки топливного газа (МУПГ) для совершенствования ее безаварийного функционирования

В. Н. Березняк¹ ✉, А.Г. Бажанов¹

¹ Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова
ул. Костюкова, д.46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: bereznyak_vlni@edu.bstu.ru

Резюме

Цель исследования – комплексное исследование технологической линии многофункциональной установки подготовки топливного газа (МУПГ), создание математической модели, способной предсказывать и контролировать сухость газа в процессе работы МУПГ, а также определение оптимальных параметров работы установки для совершенствования безаварийного функционирования и высокой производительности оборудования, использующего очищенный газ.

Методы. Осуществлено математическое моделирование с использованием модели множественной регрессии для предсказания температуры точки росы и ее влияния на безаварийную эксплуатацию установки. Адекватность модели подтверждена коэффициентом детерминации и критерием Фишера. Также представлен анализ ограничивающих факторов для безаварийной работы МУПГ, включая температуру, давление и состав газа. Оценка точности численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа произведена при помощи парных коэффициентов корреляции, коэффициентов эластичности.

Результаты. В ходе работы было произведено моделирование безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа. Возможна следующая интерпретация параметров модели: увеличение фактора X_1 на 1 приводит к уменьшению Y в среднем на 0,279; увеличение фактора X_2 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 0,46; увеличение фактора X_3 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 0,000418; увеличение фактора X_4 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 13,288; увеличение фактора X_5 на 1 приводит к уменьшению Y в среднем на 13,337; увеличение фактора X_6 на 1 приводит к уменьшению Y в среднем на 0. По максимальному коэффициенту $\beta_2=0,384$ можно сделать вывод, что наибольшее влияние на результат Y оказывает фактор X_2 . Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. По оценке точности численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа была определена сильная линейная связь между X_1 и Y , низкая линейная связь между X_2 и Y , низкая линейная связь между X_3 и Y , умеренная линейная связь между X_4 и Y , умеренная линейная связь между X_5 и Y , умеренная линейная связь между X_6 и Y .

Заключение. Установлено, что в исследуемой ситуации: «в возможности предсказания и контроля сухости газа: обоснование гипотезы о возможности предсказания температуры точки росы и ее влияния на безаварийную работу» параметры модели статистически значимы.

Ключевые слова: многофункциональная установка подготовки газа; сатуратор; сепаратор двухфазный; нагреватель; дроссельный клапан (регулятор давления); математическая модель; модель множественной регрессии; корреляция; детерминация; критерий Фишера; точка росы; сухость газа; эластичность.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Березняк В. Н., Бажанов А. Г. Математическое моделирование работы технологической линии многофункциональной установки подготовки топливного газа (МУПГ) для совершенствования ее безаварийного функционирования // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №3. С. 164-183. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-164-183>.

Поступила в редакцию 19.07.2024

Подписана в печать 09.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Mathematical modelling of the process line of a multifunctional fuel gas preparation unit (MGPU) to improve its accident-free operation

Vladimir N. Bereznyak ¹ ✉, Alexander G. Bazhanov ¹

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
46 Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: bereznyak_vlni@edu.bstu.ru

Abstract

The purpose of the research is a comprehensive study of the process line of a multifunctional fuel gas preparation unit (MGPU), creation of a mathematical model capable of predicting and controlling gas dryness in the process of MGPU operation, as well as determination of optimal parameters of the unit operation to improve accident-free operation and high productivity of the equipment using treated gas.

Methods. Mathematical modeling with the use of multiple regression model for prediction of dew point temperature and its influence on accident-free operation of the plant was carried out. The adequacy of the model was confirmed by the coefficient of determination and Fisher's criterion. An analysis of the limiting factors for the accident-free operation of the MGPU, including temperature, pressure and gas composition, is also presented. The accuracy of numerical modeling of the trouble-free operation of the MUPG process line based on the developed model of multiple regression of gas dryness was estimated using paired correlation coefficients and elasticity coefficients.

Results. In the course of the work, the accident-free operation of the process line of MGPU was modeled based on the developed multiple regression model of gas dryness. The following interpretation of the model parameters is possible: increasing factor X_1 by 1 leads to an average decrease in Y by 0.279; increasing factor X_2 by 1 leads to an average increase in Y by 0.46; increasing factor X_3 by 1 leads to an average increase in Y by 0.000418; increasing factor X_4 by 1 leads to an average increase in Y by 13.288; increasing factor X_5 by 1 leads to an average decrease in Y by 13.337; increasing factor X_6 by 1 leads to an average decrease in Y by 0. According to the maximum coefficient $\beta_2=0.384$ we can conclude that the factor X_2 has the greatest influence on the result Y . Statistical significance of the equation was tested using the coefficient of determination and Fisher's criterion. According to the assessment of the accuracy of numerical modeling of the trouble-free operation of the MUPG process line, based on the developed model of multiple regression of gas dryness, a strong linear relationship between X_1 and Y , a low linear relationship between X_2 and Y , a low linear relationship between X_3 and Y , a moderate linear relationship between X_4 and Y , a moderate linear relationship between X_5 and Y , moderate linear relationship between X_6 and Y .

Conclusion. It was found that in the investigated situation: "in the possibility of prediction and control of gas dryness: justification of the hypothesis about the possibility of prediction of dew point temperature and its influence on accident-free operation" the parameters of the model are statistically significant.

Keywords: multifunctional gas preparation unit; saturator; two-phase separator; heater; throttle valve (pressure regulator); mathematical model; multiple regression model; correlation; determination; Fisher criterion; dew point; dryness of gas; elasticity.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Bereznyak V. N., Bazhanov A. G. Mathematical modelling of the process line of a multifunctional fuel gas preparation unit (MGPU) to improve its accident-free operation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 164-183 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-164-183>.

Received 19.07.2024

Accepted 09.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Объектом математического моделирования является функционирование и происходящие процессы в модуле подготовки топливного газа, который также на практике часто называется: системой кондиционирования газа (СКГ), системой фильтрации газа (СФГ), многофункциональной установкой подготовки газа (МУПГ)¹ [1].

МУПГ предназначены для качественной очистки топливного газа для последующей его подачи и использования в газовых турбинах и двигателях, а также для обработки, очистки попутного нефтяного газа перед его транспортировкой, распределением. Предварительная обработка газа, а именно его кондиционирование, сегодня на практике является важным технологическим процессом очистки газа для дальнейшего его использования [2], к примеру, в газовых турбинах, так как данный процесс его очистки позволяет повысить

долговечность и производительность использующего очищенный газ оборудования² [1].

Таким образом, основная функциональность МУПГ заключается в обеспечении различного газового оборудования, к примеру газовых турбин, генераторов и технологических печей, чистым обработанным газом. Переработанный газ также может использоваться как уплотняющий, продувочный либо бытовой газ.

Для выполнения основного технологического процесса очистки газа обычная МУПГ имеет структуру, в которую входят такие функциональные блоки, как:

- скруббер (барабанный сепаратор);
- коалесцирующий фильтр;
- электронагреватели;
- редукционные клапаны;
- предохранительные клапаны;
- управляющие клапаны³ [3].

² Зубарев В. И. Моделирование технологических процессов подготовки природного газа нечеткими системами: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 150 с.

³ Романов И. С. Разработка математических моделей абсорбционной осушки и гидратообразования при подготовке газа: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2012. 175 с.

¹ Бирюков А.В. Моноблочная установка очистки природного газа от механических примесей: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2017. 137 с.

Также в зависимости от измерительных приборов параметров топливного газа на входе МУПГ могут быть оборудованы функциональными блоками нагревателей, либо охладителей¹.

Для общего описания технологического процесса очистки топливного газа в МУПГ важно выделить: чтобы на практике обеспечить снижение такого параметра газа до нужного уровня, как давление, в МУПГ применяются клапаны-регуляторы давления. В результате их работы адиабатический охлаждающий эффект приводит или может привести к образованию конденсата [4]. Жидкости, присутствующие в газе, проходят сквозь скрубберы, исключая возможность попадания их остатков в последующее оборудование. Газ проходит через коалесцирующий фильтр, который дальше удаляет как остатки любых жидкостей, так и твердые частицы².

В некоторых случаях для снижения давления газа на практике применяют его предварительное нагревание³. Таким образом, возможно перегревание топливного газа, что приведет к уровню температуры выше точки росы, благо-

даря чему газ сможет поступить в турбину или последующий генератор [1].

Материалы и методы

Построение функциональной схемы объекта математического моделирования

Предлагаемая функциональная схема МУПГ – это схема установки, которая автоматизирует технологический процесс очистки топливного газа для последующей его подачи и использования. Выше была определена предварительная структура и состав блоков МУПГ для выполнения основного технологического процесса очистки газа.

Функциональная схема МУПГ (рис. 1) представляет собой математическую модель технологической линии подготовки топливного газа МУПГ перед подачей к потребителю, которая содержит такие блоки, как:

1. SAT-100 – сатуратор, который предназначен для задания влажности потока.

2. V-100 – сепаратор двухфазный, который предназначен для разделения газожидкостного потока и глубокой очистки топливного газа от газового конденсата, капельной мелкодисперсной, аэрозольной влаги и механических примесей и разделения жидкостной фракции по плотности – на легкую (газоконденсат) и тяжелую (вода)⁴ [1, 3].

¹ Петрова Е. А. Математическое моделирование управляемых технологических процессов дегидратации природного газа: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2018. 140 с.

² Смирнов А. П. Разработка и исследование математических моделей технологического процесса абсорбционной осушки газа: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 160 с.

³ Кузнецов В. Н. Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов подготовки газа к транспорту: дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2013. 200 с.

⁴ Романов И. С. Разработка математических моделей абсорбционной осушки и гидратообразования при подготовке газа: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2012. 175 с.

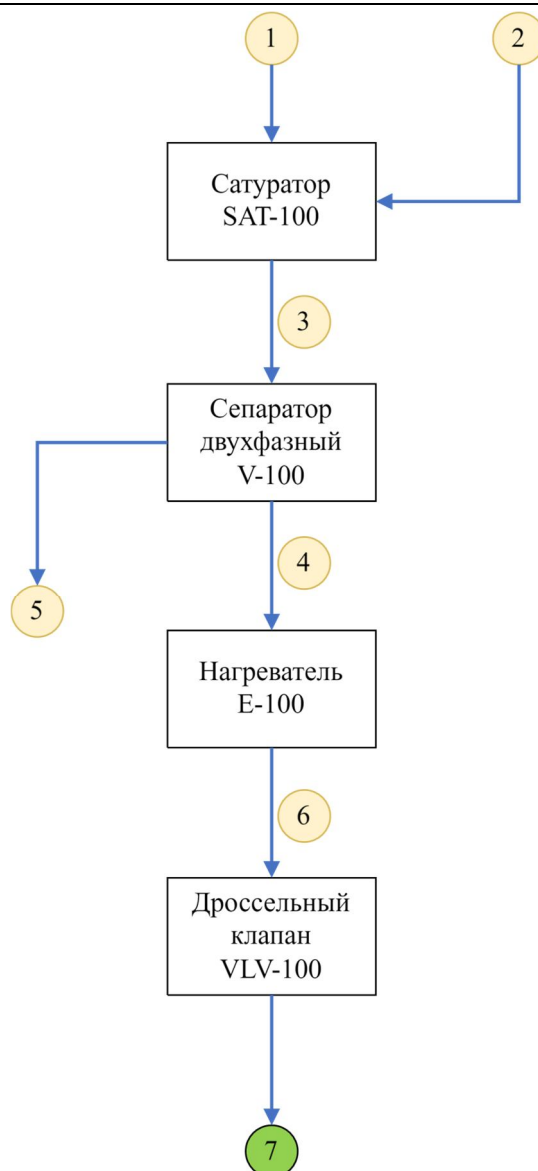


Рис. 1. Функциональная схема технологической линии подготовки топливного газа

Fig. 1. Functional diagram of the process line of the fuel gas preparation units

3. E-100 – нагреватель.

4. VLV-100 – дроссельный клапан (регулятор давления), который представляет из себя устройство, позволяющее регулировать просвет в точке воздуховода с целью изменения производительности и устанавливаемое в разрыв канала, регулирующее поток газозоудшной смеси путем изменения угла поворота заслонки (лопатки).

Анализ пороговых значений ограничивающих факторов (с применением численного эксперимента) для безаварийной работы технологической линии МУПГ

Выделяют такие основные ограничивающие факторы для МУПГ, как:

1. Для потока газа, который обозначен на рис. 1 в виде круга с единицей: температура; давление; расход газа; состав газа.

2. Для потока газа, который обозначен на рис. 1 в виде круга с цифрой 7: температура; давление.

Так, для расчета схемы на практике задают параметры потоку 1 (температура, давление, расход, состав), а также давление и температуру потоку 7.

Также значения основных ограничивающих факторов для МУПГ для всех узлов, представленных на рис. 1, при проведении численного эксперимента перед математическим моделированием с

целью улучшения безаварийной работы технологической линии МУПГ представлены в табл. 1.

Абсолютный анализ изменений значений основных ограничивающих факторов для МУПГ для всех узлов при проведении численного эксперимента перед математическим моделированием с целью улучшения безаварийной работы технологической линии МУПГ представлен в табл. 2.

Таблица 1. Значения основных ограничивающих факторов для МУПГ для всех узлов

Table 1. The values of the main limiting factors for MGPU for all nodes

Фактор / Factor	Узел / Unit						
	1	2	3	4	5	6	7
Температура, C^0 / Temperature, C^0	20,00	277,10	20,00	20,00	20,00	37,91	11,10
Давление, $кг/с^2$ / Pressure, $кг/с^2$	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	5,98	0,60
Расход газа, $кг/ч$ / Gas flow, $кг/ч$	7934	4,25	7947	7947	0,21	7947	7947
Состав газа / Gas composition	0,01	5,28	0,01	0,01	0,26	0,01	0,01

Таблица 2. Абсолютный анализ значений основных ограничивающих факторов для МУПГ для всех узлов

Table 2. Absolute analysis of the values of the main limiting factors for the MGPU for all nodes

Фактор / Factor	Узел / Unit						
	1	2	3	4	5	6	7
Температура, C^0 / Temperature, C^0	+0,00	+257,10	-257,10	+0,00	+0,00	+17,91	-26,81
Давление, $кг/с^2$ / Pressure, $кг/с^2$	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00	-0,02	-5,38
Расход газа, $кг/ч$ / Gas flow, $кг/ч$	+0,00	-7929,25	+7944,75	+0,00	-7946,79	+7946,79	+0,00
Состав газа / Gas composition	+0,00	+5,27	-5,27	+0,00	+0,25	-0,25	+0,00

Постановка задачи математического моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ

При постановке задачи математического моделирования основного технологического процесса в МУПГ была выдвинута гипотеза, которая заключается в возможности предсказания и контроля сухости газа: обоснование гипотезы о возможности предсказания температуры точки росы¹ и ее влияния на безаварийную работу; рассмотрение методов определения установки температуры нагревателя для гарантированного соблюдения сухости газа.

Математическая модель (модель множественной регрессии сухости газа) безаварийной работы технологической линии МУПГ

Для подтверждения выдвинутой гипотезы, которая заключается в возможности предсказания и контроля сухости газа, предлагается применить модель множественной регрессии с учетом влияния всех факторов, а также последующую оптимизационную модель сравнения результирующего показателя с влажностью и точкой росы (итерационное сравнение). Так, с целью более точного подтверждения выдвинутой гипотезы в модель множественной ре-

грессии добавлены еще два расчетных фактора: влажность газа и точка росы, которые рассчитываются отдельно для каждого узла МУПГ и встраиваются в модель множественной регрессии для оценки их влияния на сухость газа².

При определении влажности природных газов [5, 6] с относительной плотностью 0,6 при разных температурах и давлениях можно использовать уравнение Р.Ф. Бюкачека (формулы 1, 2):

$$W = \frac{A}{P} + B, \quad (1)$$

где A – влагосодержание идеального газа; P – абсолютное давление газа (кг/см^2); B – коэффициент, учитывающий не идеальность газа.

$$A = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot M \cdot 1033}{0,048 \cdot (273 + 20) \cdot Z}, \quad (2)$$

где $P_{\text{H}_2\text{O}}$ – паров воды при данной температуре, МПа; M – молекулярная масса паров; Z – коэффициент сжимаемости.

Формула для приблизительного расчета точки росы представлена выражениями:

$$T_p = \frac{b \gamma(T, \varphi)}{a - \gamma(T, \varphi)}, \quad (3)$$

$$\gamma(T, \varphi) = \frac{aT}{b + T} + \ln \varphi, \quad (4)$$

где T – температура в градусах Цельсия; φ – относительная влажность в объемных долях ($0 < \varphi < 1,0$); $a = 17,27$; $b = 237,7^\circ\text{C}$.

¹ Смирнов А. П. Разработка и исследование математических моделей технологического процесса абсорбционной осушки газа: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 160 с.; Романов И. С. Разработка математических моделей абсорбционной осушки и гидратообразования при подготовке газа: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2012. 175 с.

² Попадин Н. В. Моделирование процессов промышленной подготовки газов и газовых конденсатов: дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2002. 190 с.

Таким образом, в модели множественной регрессии безаварийной работы технологической линии МУПГ на результирующую оценку Y (сухость газа) было учтено влияние таких факторов, как:

X_1 – нормированное (умноженное на определенный корректировочный коэффициент модели) значение температуры;

X_2 – нормированное значение давления;

X_3 – нормированное значение расхода газа;

X_4 – нормированное значение состава газа;

X_5 – нормированное значение влажности газа;

X_6 – нормированное значение точки росы.

Обозначения факторов, влияющих на математическую модель (модель множественной регрессии сухости газа) безаварийной работы технологической линии МУПГ, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Факторы модели множественной регрессии сухости газа безаварийной работы технологической линии МУПГ (для всех узлов)

Table 3. Factors of the model of multiple regression of dryness of the gas of trouble-free operation of the technological line of the MGPU (for all nodes)

Фактор / Factor	Итерация / Iteration						
	1	2	3	4	5	6	7
X_1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}
X_2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	X_{27}
X_3	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}	X_{36}	X_{37}
X_4	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	X_{45}	X_{46}	X_{47}
X_5	X_{51}	X_{52}	X_{53}	X_{54}	X_{55}	X_{56}	X_{57}
X_6	X_{61}	X_{62}	X_{63}	X_{64}	X_{65}	X_{66}	X_{67}

Уравнение множественной регрессии [9] может быть представлено в виде выражения:

$$Y = f(\beta, X) + \varepsilon, \quad (5)$$

где $X = X(X_1, X_2, \dots, X_m)$ – вектор независимых (объясняющих) переменных; β – вектор параметров (подлежащих определению); ε – случайная ошибка (отклонение); Y – зависимая (объясняемая) переменная.

Теоретическое линейное уравнение множественной регрессии имеет вид

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon, \quad (6)$$

где β_0 – свободный член, определяющий значение Y , в случае, когда все объясняющие переменные X_j равны 0¹ [10, 11].

¹ Петрова Е. А. Математическое моделирование управляемых технологических процессов дегидратации природного газа: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2018. 140 с.

Для оценки влияния факторов на модель множественной регрессии сухости газа безаварийной работы технологической линии МУПГ (для всех узлов) определяется вектор оценок коэффициентов регрессии. Так, согласно методу наименьших квадратов, вектор получается из выражения:

$$S = (X^T * X)^{-1} * X^T * Y, \quad (7)$$

где X – матрица значений факторов по узлам МУПГ; X^T – транспонированная матрица значений факторов по узлам МУПГ; Y – матрица значений результирующего фактора (сухость газа), на который оказывают влияние факторы $X_1, X_2 \dots, X_6$ по узлам МУПГ¹.

Результаты и их обсуждение

Результаты численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа

Для оценки разработанной модели множественной регрессии сухости газа для прогноза безаварийной работы технологической линии МУПГ в работе был определен вектор оценок коэффициентов регрессии по выражению (7).

К матрице с переменными X_j был добавлен единичный столбец:

1	2	0,6	793,4	0,001	1	1
1	27,71	0,6	0,425	0,528	0,5	0,5
1	2	0,6	794,7	0,001	1	1
1	2	0,6	794,7	0,001	1	1
1	2	0,6	0,021	0,026	1	1
1	3,79	0,598	794,7	0,001	1	1
1	1,11	0,06	794,7	0,001	1	1

Матрица Y имеет следующий вид:

1
0,5
1
1
1
0,5
1

Матрица X^T имеет вид:

1	1	1	1	1	1	1
2	27,71	2	2	2	3,79	1,11
0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,598	0,06
793,4	0,425	794,7	794,7	0,021	794,7	794,7
0,001	0,528	0,001	0,001	0,026	0,001	0,001
1	0,5	1	1	1	1	1
1	0,5	1	1	1	1	1

В матрице $(X^T X)$ число 7, лежащее на пересечении 1-й строки и 1-го столбца, получено как сумма произведений элементов 1-й строки матрицы X^T и 1-го столбца матрицы X .

¹ Зубарев В. И. Моделирование технологических процессов подготовки природного газа нечеткими системами: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 150 с.

Матрица $(X^T X)$ имеет следующий вид:

7	40,61	3,658	3972,646	0,559	6,5	6,5
40,61	799,4403	23,75902	8671,44875	14,69378	26,755	26,755
3,658	23,75902	2,161204	1952,8602	0,334858	3,358	3,358
3972,646	8671,44875	1952,8602	3155676,101066	4,197146	3972,4335	3972,4335
0,559	14,69378	0,334858	4,197146	0,279465	0,295	0,295
6,5	26,755	3,358	3972,4335	0,295	6,25	6,25
6,5	26,755	3,358	3972,4335	0,295	6,25	6,25

Матрица $(X^T Y)$ имеет вид:

6
24,86
3,059
3575,0835
0,2945
5,75
5,75

Обратная матрица $(X^T X)^{-1}$ имеет следующий вид:

2,9307	0,3372	-3,4106	-0,00248	-19,4676	0	0
0,3372	0,4143	-1,0229	-0,000902	-21,2171	0	0
-3,4106	-1,0229	6,8212	0,00281	52,3914	0	0
-0,00248	-0,000902	0,00281	4,0E-6	0,04893	0	0
-19,4676	-21,2171	52,3914	0,04893	1094,5673	0	0
-925762156,1467	-6784,5295	33850,0347	28300,5932	899107542,0767	0	902378066,9384
-1,0259	-8,0E-6	3,8E-5	3,1E-5	0,9964	1	0

Вектор оценок коэффициентов регрессии вычисляется по выражению

$$Y(X) = (X^T X)^{-1} * X^T * Y, \quad (8)$$

0,9363
-0,2789
0,46
0,000418
13,2884
-13,3367
0

Уравнение регрессии (оценка уравнения регрессии) принимает вид

$$Y = 0,9363 - 0,2789X_1 + 0,46X_2 + 0,000418X_3 + 13,2884X_4 - 13,3367X_5. \quad (9)$$

Интерпретация коэффициентов регрессии разработанной модели множественной регрессии сухости газа для прогноза безаварийной работы технологической линии МУПГ заключается в следующем:

Константа оценивает агрегированное влияние прочих (кроме учтенных в модели X_i) факторов на результат Y и означает, что Y при отсутствии X_i составила бы 0,9363. Коэффициент b_1 указывает, что с увеличением X_1 на 1, Y снижается на 0,2789. Коэффициент b_2 указывает, что с увеличением X_2 на 1, Y увеличивается на 0,46. Коэффициент b_3 указывает, что с увеличением X_3 на 1, Y увеличивается на 0,000418. Коэффициент b_4 указывает, что с увеличением X_4 на 1, Y увеличивается на 13,2884. Коэффициент b_5 указывает, что с увеличением X_5 на 1, Y снижается на 13,3367. Коэффициент b_6 указывает, что с увеличением X_6 на 1, Y снижается на 0.

Оценка точности численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа

Оценка точности уравнения множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ осуществлялась на основании построения матрицы парных коэффициентов корреляции R .

Изначально было выбрано число наблюдений n , равное 7. Число независимых переменных в разработанной модели множественной регрессии сухости газа известно и равно 6, число регрессоров с учетом единичного вектора равно числу неизвестных коэффициентов. С учетом признака Y размерность матрицы парных коэффициентов корреляции R стала равной 8, а матрица независимых переменных X имеет размерность 7×8 .

Матрица A , составленная из Y и X , имеет следующий вид:

1	1	2	0,6	793,4	0,001	1	1
1	0,5	27,71	0,6	0,425	0,528	0,5	0,5
1	1	2	0,6	794,7	0,001	1	1
1	1	2	0,6	794,7	0,001	1	1
1	1	2	0,6	0,021	0,026	1	1
1	0,5	3,79	0,598	794,7	0,001	1	1
1	1	1,11	0,06	794,7	0,001	1	1

Транспонированная матрица имеет следующий вид:

1	1	1	1	1	1	1
1	0,5	1	1	1	0,5	1
2	27,71	2	2	2	3,79	1,11
0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,598	0,06
793,4	0,425	794,7	794,7	0,021	794,7	794,7
0,001	0,528	0,001	0,001	0,026	0,001	0,001
1	0,5	1	1	1	1	1
1	0,5	1	1	1	1	1

Матрица $X^T \cdot X$ имеет вид:

7	6	40,61	3,658	3972,646	0,559	6,5	6,5
6	5,5	24,86	3,059	3575,084	0,295	5,75	5,75
40,61	24,86	799,44	23,759	8671,449	14,694	26,755	26,755
3,658	3,059	23,759	2,161	1952,86	0,335	3,358	3,358
3972,646	3575,084	8671,449	1952,86	3155676,101	4,197	3972,434	3972,434
0,559	0,295	14,694	0,335	4,197	0,279	0,295	0,295
6,5	5,75	26,755	3,358	3972,434	0,295	6,25	6,25
6,5	5,75	26,755	3,358	3972,434	0,295	6,25	6,25

Полученная матрица имеет следующее соответствие:

$\sum n$	$\sum y$	$\sum x_1$	$\sum x_2$	$\sum x_3$	$\sum x_4$	$\sum x_5$	$\sum x_6$
$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum x_1 y$	$\sum x_2 y$	$\sum x_3 y$	$\sum x_4 y$	$\sum x_5 y$	$\sum x_6 y$
$\sum x_1$	$\sum y x_1$	$\sum x_1^2$	$\sum x_2 x_1$	$\sum x_3 x_1$	$\sum x_4 x_1$	$\sum x_5 x_1$	$\sum x_6 x_1$
$\sum x_2$	$\sum y x_2$	$\sum x_1 x_2$	$\sum x_2^2$	$\sum x_3 x_2$	$\sum x_4 x_2$	$\sum x_5 x_2$	$\sum x_6 x_2$
$\sum x_3$	$\sum y x_3$	$\sum x_1 x_3$	$\sum x_2 x_3$	$\sum x_3^2$	$\sum x_4 x_3$	$\sum x_5 x_3$	$\sum x_6 x_3$
$\sum x_4$	$\sum y x_4$	$\sum x_1 x_4$	$\sum x_2 x_4$	$\sum x_3 x_4$	$\sum x_4^2$	$\sum x_5 x_4$	$\sum x_6 x_4$
$\sum x_5$	$\sum y x_5$	$\sum x_1 x_5$	$\sum x_2 x_5$	$\sum x_3 x_5$	$\sum x_4 x_5$	$\sum x_5^2$	$\sum x_6 x_5$
$\sum x_6$	$\sum y x_6$	$\sum x_1 x_6$	$\sum x_2 x_6$	$\sum x_3 x_6$	$\sum x_4 x_6$	$\sum x_5 x_6$	$\sum x_6^2$

Парные коэффициенты корреляции
вычисляются по выражению

$$r_{xy} = \frac{\overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{s(x) \cdot s(y)} \quad (10)$$

Расчетные значения для вычисления парных коэффициентов корреляции модели множественной регрессии сухости газа представлены в табл. 4.

Таблица 4. Расчетные значения для вычисления парных коэффициентов корреляции модели множественной регрессии сухости газа

Table 4. Calculated values for calculating the paired correlation coefficients of the multiple regression model of gas dryness

Признаки x и y / Signs x and y	$\sum x^i$	$\bar{x} = \frac{\sum x^i}{n}$	$\sum y^i$	$\bar{y} = \frac{\sum y^i}{n}$	$\sum x^i \cdot y^i$	$\overline{x \cdot y} = \frac{\sum x^i \cdot y^i}{n}$
Для y и x ₁	40,61	5,801	6	0,857	24,86	3,551
Для y и x ₂	3,658	0,523	6	0,857	3,059	0,437
Для y и x ₃	3972,646	567,521	6	0,857	3575,084	510,726
Для y и x ₄	0,559	0,0799	6	0,857	0,295	0,0421
Для y и x ₅	6,5	0,929	6	0,857	5,75	0,821
Для y и x ₆	6,5	0,929	6	0,857	5,75	0,821
Для x ₁ и x ₂	3,658	0,523	40,61	5,801	23,759	3,394
Для x ₁ и x ₃	3972,646	567,521	40,61	5,801	8671,449	1238,778
Для x ₁ и x ₄	0,559	0,0799	40,61	5,801	14,694	2,099
Для x ₁ и x ₅	6,5	0,929	40,61	5,801	26,755	3,822
Для x ₁ и x ₆	6,5	0,929	40,61	5,801	26,755	3,822
Для x ₂ и x ₃	3972,646	567,521	3,658	0,523	1952,86	278,98
Для x ₂ и x ₄	0,559	0,0799	3,658	0,523	0,335	0,0478
Для x ₂ и x ₅	6,5	0,929	3,658	0,523	3,358	0,48
Для x ₂ и x ₆	6,5	0,929	3,658	0,523	3,358	0,48

Признаки x и y / Signs x and y	$\sum x^i$	$\bar{x} = \frac{\sum x^i}{n}$	$\sum y^i$	$\bar{y} = \frac{\sum y^i}{n}$	$\sum x^i \cdot y^i$	$\overline{x \cdot y} = \frac{\sum x^i \cdot y^i}{n}$
Для x ₃ и x ₄	0,559	0,0799	3972,646	567,521	4,197	0,6
Для x ₃ и x ₅	6,5	0,929	3972,646	567,521	3972,434	567,491
Для x ₃ и x ₆	6,5	0,929	3972,646	567,521	3972,434	567,491
Для x ₄ и x ₅	6,5	0,929	0,559	0,0799	0,295	0,0421
Для x ₄ и x ₆	6,5	0,929	0,559	0,0799	0,295	0,0421
Для x ₅ и x ₆	6,5	0,929	6,5	0,929	6,25	0,893

Таким образом, парные коэффициенты корреляции имеют следующие значения и обоснования.

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о сильной линейной связи между x₁ и y:

$$r_{yx_1} = \frac{3,551 - 5,801 * 0,857}{8,975 * 0,226} = -0,701.$$

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о низкой линейной связи между x₂ и y:

$$r_{yx_2} = \frac{0,437 - 0,523 * 0,857}{0,189 * 0,226} = -0,256.$$

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о низкой линейной связи между x₃ и y:

$$r_{yx_3} = \frac{510,726 - 567,521 * 0,857}{358,791 * 0,226} = 0,3.$$

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о умеренной линейной связи между x₄ и y:

$$r_{yx_4} = \frac{0,0421 - 0,0799 * 0,857}{0,183 * 0,226} = -0,638.$$

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о умеренной линейной связи между x₅ и y:

$$r_{yx_5} = \frac{0,821 - 0,929 * 0,857}{0,175 * 0,226} = 0,645.$$

Значение данного парного коэффициента корреляции свидетельствует о умеренной линейной связи между x₆ и y:

$$r_{yx_6} = \frac{0,821 - 0,929 * 0,857}{0,175 * 0,226} = 0,645.$$

Другие вычисления значений парных коэффициентов корреляции представлены матрицей парных коэффициентов корреляции R:

-	y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆
y	1	-0.7011	-0.256	0.2996	-0.6376	0.6455	0.6455
x ₁	-0.7011	1	0.2139	-0.6378	0.9951	-0.9966	-0.9966
x ₂	-0.256	0.2139	1	-0.2596	0.1765	-0.1674	-0.1674
x ₃	0.2996	-0.6378	-0.2596	1	-0.6805	0.6453	0.6453
x ₄	-0.6376	0.9951	0.1765	-0.6805	1	-0.9989	-0.9989
x ₅	0.6455	-0.9966	-0.1674	0.6453	-0.9989	1	1
x ₆	0.6455	-0.9966	-0.1674	0.6453	-0.9989	1	1

В табл. 5 представлены также численные парные значения дисперсии и

среднеквадратического отклонения модели множественной регрессии сухости.

Таблица 5. Парные значения дисперсии и среднеквадратического отклонения модели множественной регрессии сухости

Table 5. Paired values of variance and standard deviation of the multiple regression model of dryness

Признаки x и y / Signs x and y	$D(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \bar{x}^2$	$D(y) = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} - \bar{y}^2$	$s(x) = \sqrt{D(x)}$	$s(y) = \sqrt{D(y)}$
Для y и x ₁	80,549	0,051	8,975	0,226
Для y и x ₂	0,0357	0,051	0,189	0,226
Для y и x ₃	128730,948	0,051	358,791	0,226
Для y и x ₄	0,0335	0,051	0,183	0,226
Для y и x ₅	0,0306	0,051	0,175	0,226
Для y и x ₆	0,0306	0,051	0,175	0,226
Для x ₁ и x ₂	0,0357	80,549	0,189	8,975
Для x ₁ и x ₃	128730,948	80,549	358,791	8,975
Для x ₁ и x ₄	0,0335	80,549	0,183	8,975
Для x ₁ и x ₅	0,0306	80,549	0,175	8,975
Для x ₁ и x ₆	0,0306	80,549	0,175	8,975
Для x ₂ и x ₃	128730,948	0,0357	358,791	0,189
Для x ₂ и x ₄	0,0335	0,0357	0,183	0,189
Для x ₂ и x ₅	0,0306	0,0357	0,175	0,189
Для x ₂ и x ₆	0,0306	0,0357	0,175	0,189
Для x ₃ и x ₄	0,0335	128730,948	0,183	358,791
Для x ₃ и x ₅	0,0306	128730,948	0,175	358,791
Для x ₃ и x ₆	0,0306	128730,948	0,175	358,791
Для x ₄ и x ₅	0,0306	0,0335	0,175	0,183
Для x ₄ и x ₆	0,0306	0,0335	0,175	0,183
Для x ₅ и x ₆	0,0306	0,0306	0,175	0,175

В работе также был произведен анализ параметров уравнения множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ.

Так, статистический анализ полученного уравнения регрессии на практике всегда сводится к проверке значи-

мости уравнения и его коэффициентов, исследованию абсолютных и относительных ошибок аппроксимации¹ [12].

¹ Бородюк В. П. Методология и опыт применения моделей множественной регрессии в задачах идентификации производственных процессов по данным пассивного эксперимента: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1981. 488 с.

Вычисляют несмещенную ошибку дисперсии (абсолютную ошибку аппроксимации) по выражению

$$\varepsilon = Y - Y(x) = Y - X * s. \quad (11)$$

Так, дополнительные вычисления для несмещенной оценки дисперсии представлены в табл. 6.

Таблица 6. Дополнительные вычисления для несмещенной оценки дисперсии

Table 6. Additional calculations for unbiased variance estimation

Y	Y(x)	$\varepsilon = Y - Y(x)$	ε^2	$(Y - \bar{Y})^2$	$ \varepsilon: Y $
1	-12.337	13.337	177.878	0.0204	13.337
0.5	-6.168	6.668	44.467	0.128	13.337
1	-12.337	13.337	177.863	0.0204	13.337
1	-12.337	13.337	177.863	0.0204	13.337
1	-12.337	13.337	177.868	0.0204	13.337
0.5	-12.837	13.337	177.868	0.128	26.673
1	-12.337	13.337	177.868	0.0204	13.337
			1111.677	0.357	106.694

Средняя ошибка аппроксимации множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ представлена выражением

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n |\frac{\varepsilon}{Y}|}{n} \cdot 100\% = \frac{106,694}{7} \cdot 100\% = 1524,2\%. \quad (12)$$

Оценка дисперсии представлена выражением

$$s_e^2 = (Y - Y(X))^T (Y - Y(X)) = 1111,677. \quad (13)$$

Несмещенная оценка дисперсии представлена выражением

$$s^2 = \frac{1}{n-m-1} \cdot s_e^2 = \frac{1}{7-6-1} \cdot 1111,677 = 1111,6765. \quad (14)$$

Оценка среднеквадратичного отклонения (стандартная ошибка для оценки Y) представлена выражением

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{1111,6765} = 33,342. \quad (15)$$

Анализ эластичности численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа

Также с целью расширения возможностей содержательного анализа модели множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ регрессии в работе был произведен расчет частных коэффициентов эластичности, которые определяются по выражению

$$E_i = b_i \cdot \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}}. \quad (16)$$

На практике частный коэффициент эластичности показывает, насколько процентов в среднем изменяется признак-результат с увеличением признака-фактора x_j на 1% от своего среднего уровня при фиксированном положении других факторов модели.

Таким образом, частные коэффициенты эластичности имеют следующие значения и обоснования.

При изменении фактора X_1 на 1%, Y изменится на -1,888%. Частный коэффициент эластичности $|E_1| > 1$, следовательно, он существенно влияет на результативный признак Y :

$$E_1 = -0,279 \cdot \frac{5,801}{0,86} = -1,888.$$

При изменении фактора X_2 на 1%, Y изменится на 0,28%. Частный коэффициент эластичности $|E_2| < 1$, следовательно, его влияние на результативный признак Y незначительно:

$$E_2 = 0,46 \cdot \frac{0,523}{0,86} = 0,28.$$

При изменении фактора X_3 на 1%, Y изменится на 0,277%. Частный коэффициент эластичности $|E_3| < 1$, следовательно, его влияние на результативный признак Y незначительно:

$$E_3 = 0,000418 \cdot \frac{567,521}{0,86} = 0,277.$$

При изменении фактора X_4 на 1%, Y изменится на 1,238%. Частный коэффициент эластичности $|E_4| > 1$, следовательно, он существенно влияет на результативный признак Y :

$$E_4 = 13,288 \cdot \frac{0,0799}{0,86} = 1,228.$$

При изменении фактора X_5 на 1%, Y изменится на -14,448%. Частный коэффициент эластичности $|E_5| > 1$, следовательно, он существенно влияет на результативный признак Y :

$$E_5 = -13,337 \cdot \frac{0,929}{0,86} = -14,448.$$

При изменении фактора X_6 на 1%, Y изменится на 0%. Частный коэффициент эластичности $|E_6| < 1$, следовательно, его влияние на результативный признак Y незначительно:

$$E_6 = 0 = 0.$$

Оценка влияния факторов на результат численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа

На практике тесноту совместного влияния факторов на результат оценивают с помощью индекса множественной корреляции (R). В отличие от парного коэффициента корреляции, который может принимать отрицательные значения, он принимает значения от 0 до 1. Поэтому R не может быть использован для интерпретации направления связи. Чем плотнее фактические значения y_i располагаются относительно линии регрессии, тем меньше остаточная дисперсия и, следовательно, больше величина $R_{y(x_1, \dots, x_m)}$.

Таким образом, при значении R , близком к 1, уравнение регрессии лучше описывает фактические данные, и факторы сильнее влияют на результат. При значении R , близком к 0, уравнение регрессии плохо описывает фактические данные, и факторы оказывают слабое воздействие на результат.

Коэффициент корреляции уравнения множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ рассчитывается по выражению

$$R^2 = 1 - \frac{s_e^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 0,3111. \quad (17)$$

Значимость численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа (для заинтересованных сторон)

Проверка общего качества уравнения множественной регрессии сухости газа для безаварийной работы технологической линии МУПГ осуществлялась на основании проверки гипотезы об общей значимости – гипотезы об одновременном равенстве нулю всех коэффициентов регрессии при объясняющих переменных:

$$H_0: R^2 = 0; \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0, \quad (18)$$

$$H_1: R^2 \neq 0, \quad (19)$$

где R – коэффициент корреляции.

Проверка этой гипотезы осуществляется с помощью F -статистики распределения Фишера (правосторонняя проверка) заключается в следующем:

Если $F < F_{kp} = F_{\alpha; n-m-1}$, то нет оснований для отклонения гипотезы H_0 .

Значение F определяется по выражению

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} * \frac{n-m-1}{m} = \frac{0}{3111,6942-1-3111,6942} * \frac{7-6-1}{6} = 0. \quad (20)$$

Табличное значение при степенях свободы $k_1 = 6$ и $k_2 = n - m - 1 = 7 - 6 - 1 = 0$, $F_{kp}(6;0) = 0$.

Поскольку фактическое значение $F > F_{kp}$, то коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно (а именно коэффициенты b_i совместно значимы).

Выводы

В ходе работы было произведено моделирование безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа:

$$Y = 0,9363 - 0,2789X_1 + 0,46X_2 + 0,000418X_3 + 13,2884X_4 - 13,3367X_5.$$

Возможна следующая интерпретация параметров модели: увеличение фактора X_1 на 1 приводит к уменьшению Y в среднем на 0,279; увеличение фактора X_2 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 0,46; увеличение фактора X_3 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 0,000418; увеличение фактора X_4 на 1 приводит к увеличению Y в среднем на 13,288; увеличение фактора X_5 на 1 приводит к уменьшению Y в

среднем на 13,337; увеличение фактора X_6 на 1 приводит к уменьшению Y в среднем на 0.

По максимальному коэффициенту $\beta_2=0,384$ можно сделать вывод, что наибольшее влияние на результат Y оказывает фактор X_2 . Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации: «в возможности предсказания и контроля сухости газа: обоснование гипотезы о возможности предсказания температуры точки росы и ее влияния на

безаварийную работу» параметры модели статистически значимы.

По оценке точности численного моделирования безаварийной работы технологической линии МУПГ на основании разработанной модели множественной регрессии сухости газа была определена сильная линейная связь между X_1 и Y , низкая линейная связь между X_2 и Y , низкая линейная связь между X_3 и Y , умеренная линейная связь между X_4 и Y , умеренная линейная связь между X_5 и Y , умеренная линейная связь между X_6 и Y .

Список литературы

1. Рубанов А. Энергаз внедряет многофункциональные установки подготовки газа // СФЕРА. Нефть и Газ: отраслевой журнал. 2019. №4. С. 38–45.
2. Ежов В.С., Семичева Н.Е. Методы решения проблемы образования кристаллогидратов в системах газоснабжения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. №1. С. 79-82.
3. Вяхирев Р. И. Российская газовая энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 2004. 529 с.
4. Щедрина Г.Г., Гнездилова О.А. Энергоэффективные методы нормализации параметров природного газа // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. №2. С. 31-35.
5. Жданова Н. В., Халиф А. Л. Осушка углеводородных газов. М.: Химия, 1984. 192 с.
6. Бурцев С. И., Цветков Ю. Н. Влажный воздух. Состав и свойства. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 1998. 146 с.
7. Лурье М. В. Проектирование и эксплуатация газопроводов = Project and operations of gas pipelines: лекции о проектировании и эксплуатации газопроводов. М.: РГУ, 2023. 276 с.
8. Зарубежные газоперекачивающие агрегаты / А. Г. Ермошкин, И. И. Радчик, В. В. Федосеев [и др.]. М.: Недра, 1979. 247 с.

9. Чалганова А. А. Построение множественной регрессии и оценка качества модели с использованием табличного процессора Excel. СПб.: РГМУ, 2022. 106 с.
10. Лозовская А. Н. Введение в эконометрику. Модели множественной линейной регрессии. М.: РЭУ, 2021. 55 с.
11. Новиков А. И. Эконометрика. М.: ИНФРА-М, 2003. 104 с.
12. Гателюк О. В., Круковская Т. Ю. Эконометрика. Модели парной и множественной регрессии. Омск: ОмГУПС, 2023. 44 с.

References

1. Rubanov A. Energas Implements Multifunctional Gas Preparation Units. *SFERA. Neft' i Gaz = SPHERE: Oil and Gas*. 2019; (4): 38-45 (In Russ.).
2. Yezhov V.S., Semicheva N.E. Methods of the solution of the problem of formation of crystalline hydrates in systems of gas supply. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2016; (1): 79-82 (In Russ.).
3. Vyakhirev R. I. Russian Gas Encyclopedia. Moscow: Big Russian Encyclopedia; 2004. 529 p. (In Russ.).
4. Shchedrina G.G., Gnezdilova O.A. Energy efficient method of normalization parameters of natural gas. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2012; (2): 31-35 (In Russ.).
5. Zhdanova N. V., Khalif A. L. Drying of Hydrocarbon Gases. Moscow: Khimiya; 1984. 192 p. (In Russ.).
6. Burtsov S. I., Tsvetkov Yu. N. Moist Air: Composition and Properties. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design; 1998. 146 p. (In Russ.).
7. Lurie M. V. Project and operations of gas pipelines. Moscow; 2023. 276 p. (In Russ.).
8. Yermoshkin A. G., Radchik I. I., Fedoseev V. V., et al. Foreign Gas Compressor Units. Moscow: Nedra; 1979. 247 p. (In Russ.).
9. Chalganova A. A. Building Multiple Regression Models and Assessing Model Quality Using Excel. St. Petersburg: RGGU; 2022. 106 p. (In Russ.).
10. Lozovskaya A. N. Introduction to econometrics. Multiple linear regression models. Moscow: PRUE; 2021. 55 p. (In Russ.).
11. Novikov A. I. Econometrics. Moscow: INFRA-M; 2003. 104 p. (In Russ.).
12. Gateliuk O. V., Krukovskaya T. Y. Econometrics. Paired and multiple regression models. Omsk: OmGUPS; 2023. 44 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Березняк Владимир Николаевич, аспирант кафедры технической кибернетики, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4971-9839>, e-mail: bereznyak_vlni@edu.bstu.ru

Vladimir N. Bereznyak, Post-Graduate Student of the Technical Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4971-9839>, e-mail: bereznyak_vlni@edu.bstu.ru

Бажанов Александр Геральдович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5229-0412>, e-mail: all_exe@mail.ru

Alexander G. Bazhanov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Technical Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russian Federation, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5229-0412>, e-mail: all_exe@mail.ru