

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 5 / 2024, Vol. 16, Iss. 5 <https://esj.today/issue-5-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/04SAVN524.pdf>

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Автомонов, Е. Г. Влияние качества газа на производительность газовых турбин: количественный анализ / Е. Г. Автомонов, Е. А. Максимов, А. И. Гулевич, С. А. Глобенко, Д. Д. Кузьмин, А. С. Добронравов // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 5. — URL: <https://esj.today/PDF/04SAVN524.pdf>

**For citation:**

Avtomonov E.G., Maximov E.A., Gulevich A.I., Globenko S.A., Kuzmin D.D., Dobronravov A.S. The impact of gas quality on gas turbine performance: a quantitative analysis. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(5): 04SAVN524. Available at: <https://esj.today/PDF/04SAVN524.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 62-9

**Автомонов Евгений Геннадьевич**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», п. Аякс, Россия  
Доцент

E-mail: [avtomonov.eg@dvfu.ru](mailto:avtomonov.eg@dvfu.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1031730](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1031730)

**Максимов Егор Андреевич**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», п. Аякс, Россия  
E-mail: [maksimov.ean@dvfu.ru](mailto:maksimov.ean@dvfu.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7896-8243>

**Гулевич Александр Игоревич**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», п. Аякс, Россия  
E-mail: [gulevich.ai@dvfu.ru](mailto:gulevich.ai@dvfu.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1400-4688>

**Глобенко Сергей Алексеевич**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», п. Аякс, Россия  
E-mail: [Poyn63755@mail.ru](mailto:Poyn63755@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3932-5959>

**Кузьмин Даниил Дмитриевич**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», п. Аякс, Россия  
E-mail: [kuzmin.ddm@dvfu.ru](mailto:kuzmin.ddm@dvfu.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7665-4121>

**Добронравов Александр Сергеевич**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: [aleksandrdobronravov584@gmail.com](mailto:aleksandrdobronravov584@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4890-6314>

**Влияние качества газа на  
производительность газовых турбин:  
количественный анализ**

**Аннотация.** В статье исследуется ключевой фактор, оказывающий влияние на работу газовых турбин, — качество газа. Газовые турбины играют центральную роль в современном энергетическом секторе благодаря своей способности эффективно преобразовывать энергию газа в механическую работу. Тем не менее, характеристики газа, используемого в турбинах, могут существенно варьироваться, что непосредственно влияет на эффективность и надежность работы оборудования.

Основное внимание в исследовании уделяется количественному анализу влияния на турбины различных примесей в газе, таких как вода, диоксид серы и углекислый газ. Эти примеси могут снижать низшую теплоту сгорания газа, что, в свою очередь, влияет на общую производительность турбины. Например, вода может приводить к образованию конденсата и ускоренному износу компонентов турбины, тогда как диоксид серы может способствовать образованию коррозионных очагов. В рамках исследования применен математический подход для оценки воздействия этих примесей на теплотворную способность газа. Результаты показывают, что хотя каждое из веществ вносит определенное снижение теплоты сгорания газа, совокупное влияние примесей оказывает внушительное воздействие. Это говорит о том, что хотя влияние отдельных примесей относительно невелико, их совокупное воздействие все же требует учета при эксплуатации газовых турбин.

Исследование подчеркивает важность контроля качества газа для обеспечения эффективной и стабильной работы газовых турбин. Полученные данные могут быть полезны для инженеров и операторов в процессе проектирования и эксплуатации турбин, а также для разработки систем мониторинга и очистки газа. Знание о влиянии качества газа помогает минимизировать затраты на обслуживание и улучшить долговечность оборудования.

**Ключевые слова:** газовые турбины; качество газа; низшая теплота сгорания; эффективность турбин; математическое моделирование; коррозия; конденсат; системы контроля и очистки газа

## Введение

Газовые турбины играют ключевую роль в современном энергетическом секторе и находят широкое применение в различных областях благодаря своей высокой эффективности и экономическому эффекту от их применения на производстве. Они используются в генерации электроэнергии, авиации, морском транспорте и нефтегазовой промышленности, обеспечивая надежную работу.

Принцип действия газовой турбины основан на термодинамическом цикле сжатия, сгорания и расширения. В процессе работы воздух, поступающий в турбину, сначала сжимается в компрессоре. Этот процесс увеличивает давление и температуру воздуха, что делает его более эффективным для последующего сгорания. Сжатый воздух затем направляется в камеру сгорания, где происходит его смешивание с топливом и зажигание. В результате сгорания образуются горячие газы, которые расширяются в турбине, приводя в движение ее лопатки и создавая механическую работу. Отработанные газы выбрасываются через сопло, что способствует дополнительному ускорению потока и увеличению общей мощности системы [1; 2].

Несмотря на высокую эффективность газовых турбин, их работа может быть существенно нарушена в зависимости от качества используемого газа. Примеси в газе, такие как вода, диоксид серы и углекислый газ, могут оказывать значительное влияние на характеристики газа и, соответственно, на работу турбин.

Присутствие воды в газе может привести к образованию конденсата внутри турбины, что может вызвать коррозию металлических частей и снижение эффективности работы. Конденсат также может способствовать накоплению грязи и других загрязнителей.

Диоксид серы может образовывать кислотные соединения в результате реакции с водой, что приводит к коррозии и повреждению материалов турбины. Присутствие SO<sub>2</sub> также снижает низшую теплоту сгорания газа, что уменьшает общую эффективность турбины [3].

Хотя CO<sub>2</sub> сам по себе не является таким агрессивным, его присутствие может изменять теплотворную способность газа, что также влияет на эффективность процесса сгорания и работу турбины.

Эти примеси требуют тщательного контроля и управления качеством газа, чтобы обеспечить надежную и эффективную работу газовых турбин. Правильное управление качеством газа и использование эффективных систем очистки помогают минимизировать негативное воздействие примесей и продлить срок службы турбин.

## 1. Методы и материалы

Многие примеси, такие как углекислый газ (CO<sub>2</sub>), не участвуют в химической реакции сгорания. Они просто присутствуют в газовой смеси, увеличивая её массу без добавления дополнительной энергии при сгорании. В результате, энергия, выделяющаяся при сгорании, не увеличивается пропорционально увеличению массы газа.

Примеси, такие как водяные пары, требуют дополнительного тепла для их испарения или конденсации. Это тепло уходит на изменение состояния воды, а не на выделение дополнительной энергии, что снижает эффективное теплообразование.

Некоторые примеси, такие как сероводород, сгорают, образуя побочные продукты, которые могут снижать эффективность сгорания и уменьшать теплотворную способность. Кроме того, сгорание таких примесей может приводить к образованию кислотных газов, которые требуют дополнительных усилий для удаления или нейтрализации [4; 5].

Потери тепла или теплотворной способности газа при присутствии примесных компонентов можно рассчитать по формуле (1):

$$Q_{HTC,смеси} = Q_{HTC} - \left( \frac{m_i \Delta H_i}{M} \right), \quad (1)$$

где  $Q_{HTC,смеси}$  — теплотворная способность смеси, Дж/кг;  $Q_{HTC}$  — теплотворная способность метана, Дж/кг;  $m_i$  — масса  $i$ -го компонента в смеси, кг;  $\Delta H_i$  — энергия необходимая на расщепление стойких примесных компонентов, Дж;  $M$  — масса метана в смеси, кг.

Концентрацию того или иного компонента в смеси можно вычислить по формуле (2):

$$C = \frac{m_i}{m_{смеси}} 100 \%, \quad (2)$$

где  $C$  — концентрация, %;  $m_i$  — масса  $i$ -го компонента, кг;  $m_{см.}$  — масса смеси, кг.

Кислород как самостоятельный элемент не несет за собой резкого воздействия на качество газа, однако он может реагировать с другими компонентами газа, образуя побочные продукты, которые могут ухудшать качество газа и снижать его эффективность, что и является основной из причин борьбы с содержанием кислорода в природном газе. Когда кислород вступает в реакции с серой, водородом и углеродом, в природном газе образуются следующие примеси, описанные ранее. Эти примеси увеличивают общее содержание нежелательных компонентов в газе, что приводит к снижению качества газа [5; 6].

Основным параметром, оценивающим эффективность работы того или иного агрегата, является его выходная мощность, для газотурбинной установки без учета механических потерь в ней мощность можно вычислить по формуле (3):

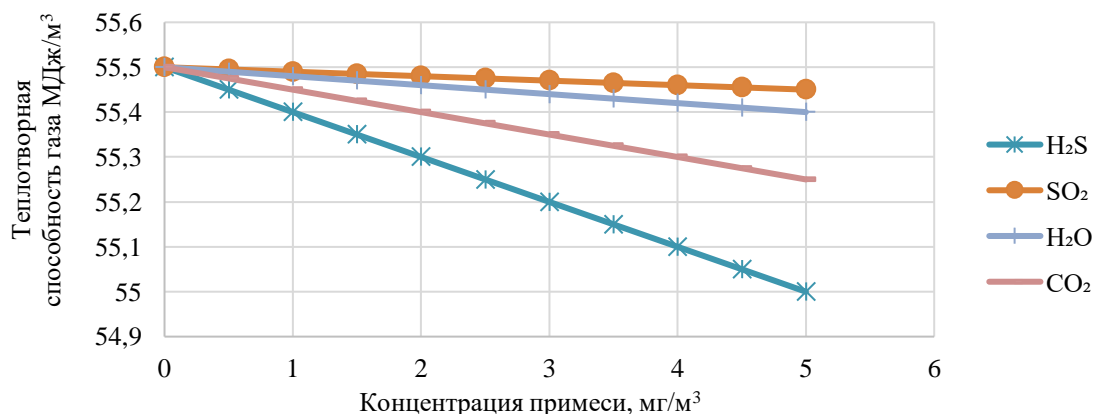
$$P = \eta(Q_{HTC} - \Delta), \quad (3)$$

где  $\eta$  — КПД турбины, %;  $\Delta$  — различные потери в турбине, кДж;  $Q_{HTC}$  — теплотворная способность смеси, кДж/кг;  $P$  — мощность турбины, кВт.

Для исследования воздействия различных примесей на качество природного газа, следует при помощи методом математического моделирования представить зависимости основных технических характеристик газа и газотурбинной установки от тех или иных примесей при различных их концентрациях [7].

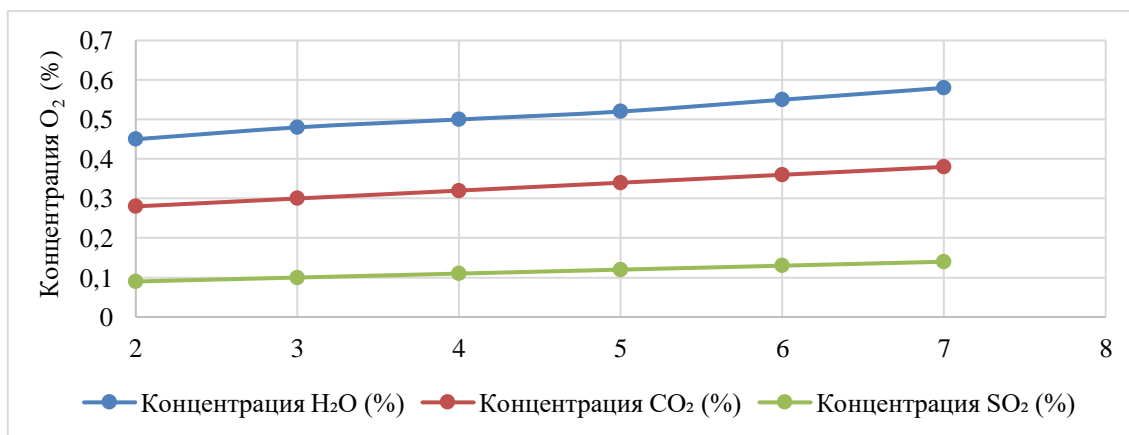
## 2. Результаты

Для того чтобы, представить воздействие примесей на теплотворную способность природного газа был построен график влияния концентрации углекислого газа, воды в парообразном состоянии, сероводорода и диоксида серы на данную характеристику газообразного топлива. График представлен на рисунке 1.



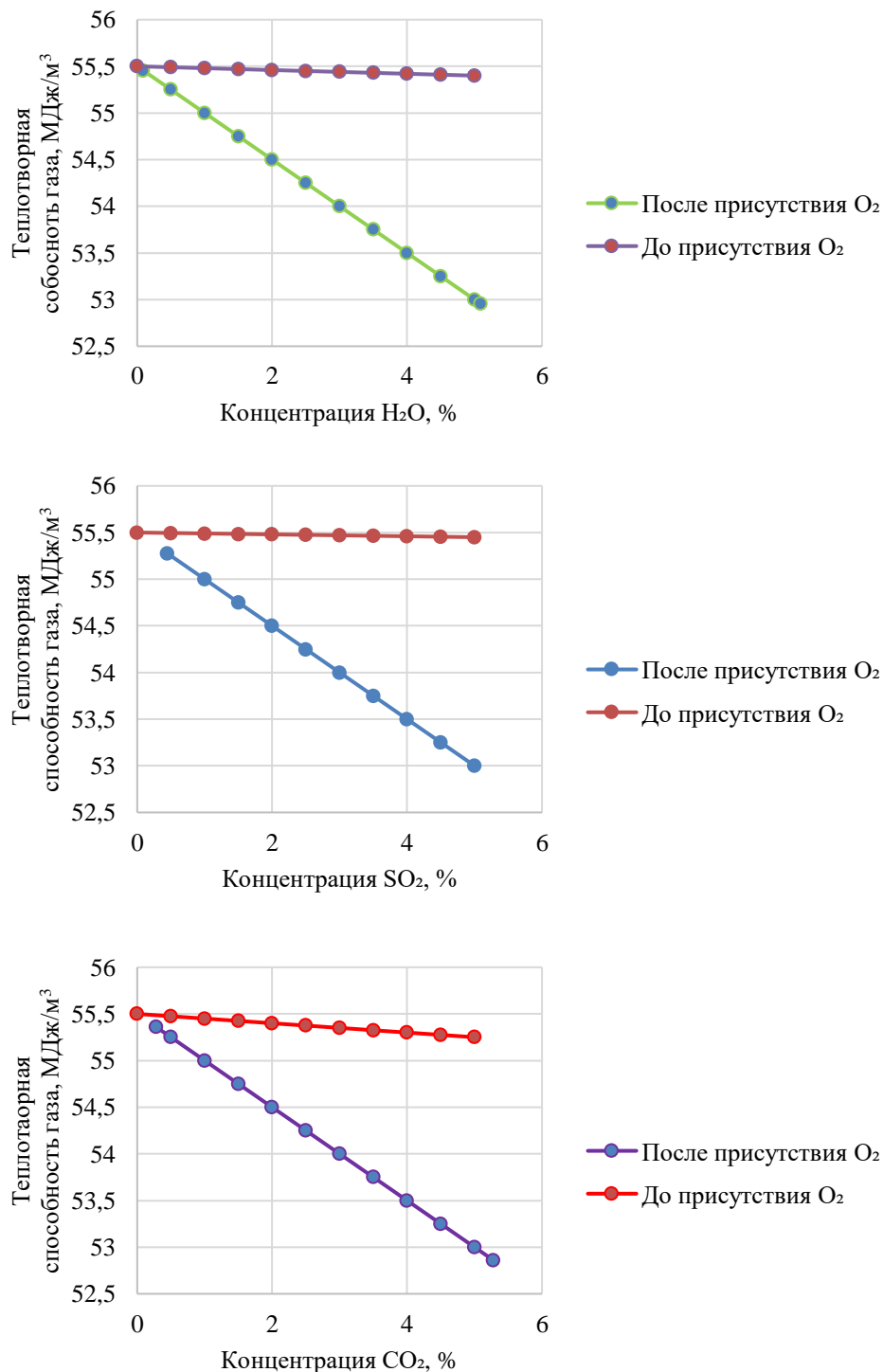
**Рисунок 1.** График зависимости теплотворной способности газа от концентраций различных примесей (составлено авторами)

В результате присутствия кислорода в смеси в следствии процесса деструктуризации соединений серы, углерода и воды, освободившиеся молекулы этих элементов образуют с кислородом новые соединения. На рисунке 2 представлен график изменения концентрации примесей CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и SO<sub>2</sub> при росте концентрации кислорода в смеси.



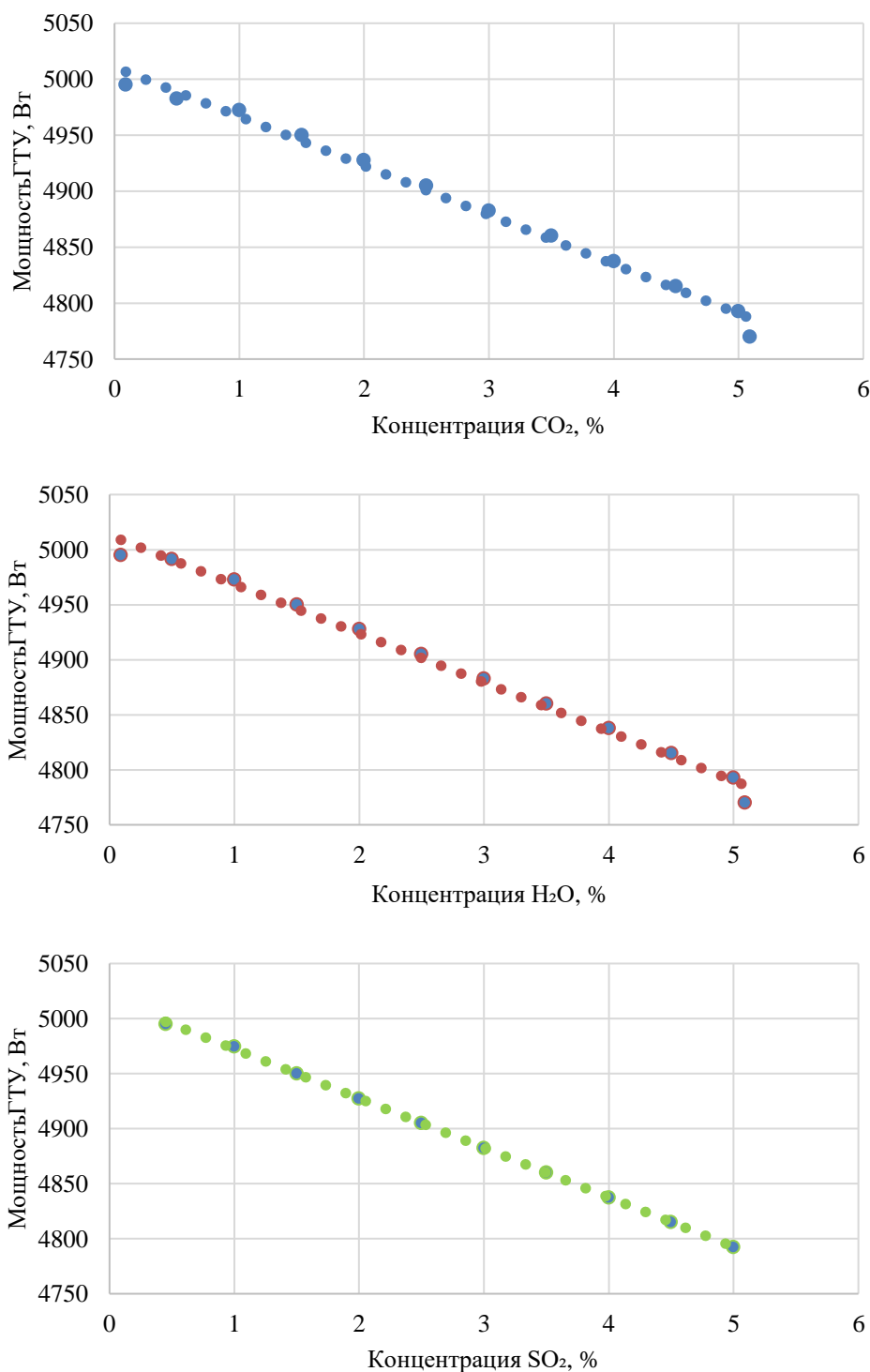
**Рисунок 2.** График изменения примесей при росте концентрации кислорода в смеси (составлено авторами)

Вследствие увеличения концентраций примесей из-за присутствия кислорода изменяется и характер графиков зависимости теплотворной способности смеси от концентрации различных примесей, представлен на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Графики зависимости теплотворной способности газа после увеличения концентрации кислорода в смеси (составлено авторами)

Для того чтобы оценить критичность изменений в работе газотурбинной установки после появления примесей в топливе был построен графики изменения мощности агрегата в зависимости от присутствия в газе той или иной примеси, они представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Графики изменения мощности агрегата (составлено авторами самостоятельно)

### 3. Обсуждение

Из графика зависимости теплотворной способности природного газа от присутствия примесей в его составе видно, что данные величины обратно пропорциональны. Причем у разных примесных соединений эта зависимость проявляется различно.

Так, например, самое большое влияние на теплотворную способность газа имеет сероводород. Несмотря на то, что сероводород как вещество в самостоятельном виде является горючим и лишь снижает качество газа, основное влияние производит именно процесс его деструктуризации в процессе нагревания и последующие образования новых сернистых соединений, тоже в свою очередь являющихся примесями и инородными соединениями в составе природного газа. Немаловажным фактором также является то, что все сернистые соединения являются причинами возникновения коррозии внутри агрегата, что в свою очередь прямым образом влияет именно на работоспособность оборудования.

Присутствие  $SO_2$  (диоксида серы) в природном газе снижает его теплотворную способность по нескольким причинам. Во-первых, наличие  $SO_2$  указывает на присутствие серосодержащих соединений, которые не участвуют в эффективном сгорании метана, основного компонента природного газа. Во-вторых,  $SO_2$ , как примесь, разбавляет горючие компоненты, уменьшая их концентрацию и, следовательно, общую теплотворную способность газа. Энергетические потери также связаны с тем, что при сгорании серосодержащих соединений выделяется меньше энергии по сравнению с чистым метаном. Кроме того,  $SO_2$  вызывает экологические и технические проблемы. Он может превращаться в серную кислоту, что приводит к коррозии оборудования, снижая эффективность систем и увеличивая затраты на обслуживание. Хотя исходя из анализа видно, что присутствие  $SO_2$  наименьшим образом влияет на теплоту сгорания природного газа, чем остальные рассматриваемые соединения [8; 9].

Присутствие  $CO_2$  (диоксида углерода) в природном газе снижает его теплотворную способность по нескольким причинам.  $CO_2$  не является горючим веществом, и его присутствие снижает концентрацию метана и других горючих компонентов, что уменьшает общую теплотворную способность газа. Во-вторых,  $CO_2$  не участвует в реакциях сгорания и не добавляет дополнительной энергии, просто занимая место, которое могло бы быть занято горючими компонентами. В-третьих,  $CO_2$  обладает высокой теплоемкостью, что позволяет ему поглощать часть тепла, выделяющегося при сгорании, снижая тем самым эффективность процесса. Наконец, наличие  $CO_2$  увеличивает общий объем газа, который необходимо сжигать для получения той же энергии, что и при меньшем количестве  $CO_2$ .

Водяной пар, как и  $CO_2$  не участвует в процессе горения и занимает долю в объеме газа, обладает высокой теплоемкостью и поглощает часть энергии, выделившейся при сгорании топлива. В случае, если газ не прошел предварительную качественную осушку, вода может присутствовать в виде капелек жидкости, таким образом часть энергии от сгорания топлива будет тратиться на испарение капельной жидкости.

Присутствие кислорода в природном газе может способствовать увеличению концентрации продуктов сгорания, таких как углекислый газ, диоксид серы и водяной пар. Это происходит следующим образом: при сгорании метана, основного компонента природного газа, в присутствии кислорода образуется углекислый газ. Если в природном газе присутствуют сернистые соединения, они реагируют с кислородом, образуя диоксид серы. Водяной пар образуется как побочный продукт сгорания метана и других углеводородов. Из-за увеличения концентрации этих продуктов сгорания теплотворная способность газа уменьшается. Таким образом кислород в природном газе выступает как множитель примесных соединений [10].

Для оценки падения работоспособности газотурбинных агрегатов были построены графики зависимости мощности агрегата от содержания различных примесей в присутствии кислорода, из которых видно, что при росте концентрации примесных соединений мощность ГТУ уменьшается. Падение мощности в среднем составляет от 3 до 5 %. При учете важности каждого процента коэффициента полезного действия газовых турбин при среднем значении этого показателя у агрегатов средней мощности на уровне 35–38 %, падение работоспособности на 5 % может оказаться причиной внушительных экономических потерь со стороны предприятия.

Повышенные концентрации примесей, таких как кислород, углекислый газ и сернистые соединения, в природном газе снижают эффективность работы газотурбинных установок. Это связано с уменьшением теплотворной способности газа, увеличением теплоёмкости продуктов сгорания и разбавлением горючих компонентов. Чтобы справиться с этой проблемой, применяются несколько подходов.

Очистка газа с использованием фильтров и абсорбентов помогает удалить примеси до его использования. Это позволяет улучшить качество газа и повысить эффективность работы установок.

Также оптимизация процесса сгорания позволяет минимизировать образование нежелательных продуктов. Это достигается за счёт точной настройки параметров сгорания, что способствует более полному и эффективному использованию топлива.

Использование катализаторов, которые помогают снизить концентрацию вредных выбросов и улучшить эффективность сгорания. Катализаторы ускоряют химические реакции, что позволяет более эффективно преобразовывать топливо в энергию. Наконец, постоянный контроль качества газа через мониторинг и анализ состава позволяет своевременно выявлять и устранять примеси. Это обеспечивает стабильную работу газотурбинных установок и поддерживает их высокую эффективность.

### Выводы

Примеси в природном газе, такие как кислород, углекислый газ и сернистые соединения, оказывают значительное негативное влияние на работу газотурбинных установок. Они снижают теплотворную способность газа, что приводит к уменьшению выделяемой энергии при сгорании. Это, в свою очередь, снижает общую производительность установки и увеличивает эксплуатационные затраты. Для предприятий, эксплуатирующих газотурбинные установки, борьба с примесями имеет несколько важных аспектов.

Присутствие примесей увеличивает расход топлива, так как для достижения той же мощности требуется больше газа. Это приводит к увеличению затрат на топливо и снижению рентабельности производства. Также примеси могут вызывать коррозию и другие формы износа оборудования, что приводит к увеличению частоты и стоимости технического обслуживания и ремонта, а также к сокращению срока службы оборудования. Помимо этого, примеси способствуют увеличению выбросов вредных веществ, таких как оксиды азота и серы, что может привести к несоответствию экологическим стандартам и, как следствие, к штрафам и санкциям со стороны регулирующих органов. Примеси могут вызывать нестабильность в процессе сгорания, что приводит к колебаниям в производительности и надёжности установки, вызывая неожиданные остановки и простои, что негативно сказывается на производственном процессе.

Для решения этих проблем предприятиям необходимо внедрять технологии очистки газа, такие как фильтрация и абсорбция, а также оптимизировать процессы сгорания с использованием катализаторов. Постоянный мониторинг качества газа позволяет своевременно выявлять отклонения и принимать меры по их устранению. Все эти меры помогают поддерживать высокую эффективность и надёжность газотурбинных установок, снижать эксплуатационные затраты и обеспечивать соответствие экологическим требованиям.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Сорока Б.С., Воробьев Н.В. Эффективность использования газового топлива и окислительной смеси при их увлажнении. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019; 62(6): 547–564. URL: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-6-547-564> (дата обращения: 01.09.2024).
2. Марьин Г.Е., Осипов Б.М., Зунино П., Менделеев Д.И. Влияние состава топлива на энергетические параметры газотурбинной установки. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. № 1 — 23–34 с., URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-sostava-topliva-na-energeticheskie-parametry-gazoturbinnoy-ustanovki/viewer> (дата обращения: 01.09.2024).
3. Клер А.М., Потанина Ю.М., Максимов А.С. Учет переменного характера тепловых нагрузок при оптимизации теплофикационных энергетических установок // Теплоэнергетика. — 2012. — № 7. — С. 63–69. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17745665> (дата обращения: 01.09.2024).
4. Gu, F., Wang, J., Guo, J., & Fan, Y. How the supply and demand of steam coal affect the investment in clean energy industry? Evidence from China. Resources Policy, 69, 101788; 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101788> (дата обращения: 01.09.2024).
5. Новоселова М.С., Мингалеева Г.Р., Марьин Г.Е., Титов А.В. Перспективы использования синтез-газа в газотурбинных установках. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024;26(1): 131–143. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-131-143> (дата обращения: 01.09.2024).
6. Yeseul Park, Minsung Choi Performance analysis of large-scale industrial gas turbine considering stable combustor operation using novel blended fuel // School of Mechanical Engineering. 2021. URL: [https://www.researchgate.net/publication/353026456\\_Performance\\_analysis\\_of\\_large-scale\\_industrial\\_gas\\_turbine\\_considering\\_stable\\_combustor\\_operation\\_using\\_novel\\_blended\\_fuel](https://www.researchgate.net/publication/353026456_Performance_analysis_of_large-scale_industrial_gas_turbine_considering_stable_combustor_operation_using_novel_blended_fuel) (дата обращения: 01.09.2024).
7. Худокормов, Г.А. Экономический рост и альтернативная энергетика: взаимосвязь и противоречия / Г.А. Худокормов // Бизнес. Образование. Право. — 2023. — № 2(63). — С. 30–35. — <https://doi.org/10.25683/VOLBI.2023.63.592>. (дата обращения: 01.09.2024).
8. Сорока Б.С. Влияние климатических факторов на теплотехнические характеристики, энергетическую эффективность и оценка экологических последствий сжигания газового топлива // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 4-6. С. 116–129. URL: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.04-06.116-129> (дата обращения: 01.09.2024).
9. Бродов Ю.М., Комаров О.В. Метод оценки технического состояния газотурбинных установок с изменяемой геометрией проточной части // Уральский федеральный университет. 2017. № 1. URL: <https://www.energyret.ru/jour/article/download/402/361> (дата обращения: 01.09.2024).
10. Roupa Agbadede. Effect of associated gas utilization on the creep life of gas turbines employed for power generation application // Department of Electrical Engineering, 2023. № 17. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100865> (дата обращения: 01.09.2024).

**Avtomonov Evgeny Gennadyevich**

Far Eastern Federal University, Ajax, Russia  
E-mail: avtomonov.eg@dvfu.ru  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=1031730](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1031730)

**Maximov Egor Andreyevich**

Far Eastern Federal University, Ajax, Russia  
E-mail: maksimov.ean@dvfu.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7896-8243>

**Gulevich Alexander Igorevich**

Far Eastern Federal University, Ajax, Russia  
E-mail: gulevich.ai@dvfu.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1400-4688>

**Globenko Sergey Alexeevich**

Far Eastern Federal University, Ajax, Russia  
E-mail: Poyr63755@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3932-5959>

**Kuzmin Daniil Dmitrievich**

Far Eastern Federal University, Ajax, Russia  
E-mail: kuzmin.ddm@dvfu.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7665-4121>

**Dobronravov Alexander Sergeyevich**

ITMO University, Saint Petersburg, Russia  
E-mail: aleksandrdobronravov584@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4890-6314>

## The impact of gas quality on gas turbine performance: a quantitative analysis

**Abstract.** This paper examines a key factor affecting the performance of gas turbines — gas quality. Gas turbines play a central role in the modern energy sector due to their ability to efficiently convert gas energy into mechanical work. However, the characteristics of the gas used in turbines can vary significantly, which directly affects the efficiency and reliability of the equipment. The study focuses on a quantitative analysis of the impact of various gas impurities on turbines, such as water, sulfur dioxide, and carbon dioxide. These impurities can reduce the net calorific value of the gas, which in turn affects the overall performance of the turbine. For example, water can lead to condensation and accelerated wear of turbine components, while sulfur dioxide can contribute to the formation of corrosion centers. The study applies a mathematical approach to assess the impact of these impurities on the calorific value of the gas. The results show that although each of the substances contributes to a certain reduction in the calorific value of the gas, the combined effect of the impurities has a significant impact. This suggests that although the impact of individual impurities is relatively small, their combined impact still needs to be taken into account when operating gas turbines. The study highlights the importance of gas quality control to ensure efficient and stable operation of gas turbines. The findings can be useful for engineers and operators in the design and operation of turbines, as well as for developing gas monitoring and cleaning systems. Knowledge of the impact of gas quality helps minimize maintenance costs and improve equipment durability.

**Keywords:** gas turbines; gas quality; net calorific value; turbine efficiency; mathematical modeling; corrosion; condensate; gas control and cleaning systems