

УДК 504.054, 504.062, 504.75.05

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОТУРБИННЫХ
УСТАНОВОК НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

**IMPACT OF OPERATION OF GAS-TURBINE INSTALLATIONS
ON THE ENVIRONMENT**

Зорина С. А.

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация**

S. A. Zorina

**Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation**

Аннотация. Природный газ является одними из основных энергоносителей, без которого ни одна отрасль народного хозяйства не сможет обеспечить себе динамичное развитие. Поэтому необходимо эффективно управлять, развивать и применять передовые технологии, в том числе технологии ресурсосбережения в магистральном транспорте газа.

Важная задача ресурсосбережения в трубопроводном транспорте сегодня – уменьшение прямых потерь газа при транспортировке и утилизация выбросов газа для собственных технологических нужд. Примерно 3,5-5,5 % от объема добычи газа по тем или иным причинам сжигается на факелах или попадает в окружающую среду. Выбросы метана в атмосферу по некоторым данным составляют 4 млрд м³ в год.

Ввиду большого количества выбросов газа и их негативного воздействия на окружающую среду был создан ряд законодательных проектов об энергосбережении и принятие обязанностей в рамках

Киотского протокола, согласно которым необходимо обеспечить к 2020 году сокращение выбросов газов в атмосферу на 40 % относительно базового уровня. Также на климатической конференции ООН в Париже 2015 года было принято «Парижское соглашение», по которому все стороны, включая РФ, должны внести свои вклады по сокращению выбросов газов в окружающую среду.

Утилизация выбросов природного газа сможет удовлетворить часть потребностей в энергии и топливе, таким образом, потребление энергии и топлива от первичных источников будет сокращается.

Abstract. Natural gas is one of the main energy carriers without which any branch of the national economy will not be able to ensure dynamic development. Therefore, it is necessary to control, develop and apply effectively advanced technologies, including technologies of resource-saving in trunk transport of gas.

The important task of resource-saving in pipeline transport today – reduction of real loss of gas when transporting and utilization of bursts of gas for own technological needs. About 3,5-5,5 % of the volume of gas production are for one reason or another burned on torches or gets to the environment. Bursts of methane in the atmosphere according to some information make approximately 4 billion m³ a year.

In view of a large number of bursts of gas and their negative impact on the environment a row of legislative projects about energy saving and acceptance of duties within the Kyoto Protocol according to which it is necessary to provide by 2020 abbreviation of bursts of gases in the atmosphere for 40 % of rather basic level was created. And also at a climatic conference of the UN in Paris of 2015 «The Parisian agreement» under which all sides including the Russian Federation, shall make the contributions on abbreviation of bursts of gases to the environment was accepted.

Utilization of bursts of natural gas will be able to satisfy a part of needs for energy and fuel, thus consuming of energy and fuel from primary sources will be is reduced.

Ключевые слова: экология, природный газ, газотурбинные установки, трубопроводный транспорт.

Key words: ecology, natural gas, gas turbines unit, pipeline transportation.

Газоперекачивающие агрегаты (ГПА) высокой мощности, установленные на современных компрессорных станциях, являются инженерными сооружениями, эксплуатация которых неизбежно происходит с серьезными загрязнениями окружающей среды.

При работе ГПА и разных технологических систем компрессорных станций происходят выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, сбросы вредных веществ в водоемы, образование токсиносодержащих отходов, различные воздействия на почву на территории компрессорной станции и т.п.

Выбросы вредных веществ на компрессорных станциях можно подразделить на две большие группы: выбросы выхлопных газов как продуктов сгорания при эксплуатации ГПА, и выбросы непосредственно природного газа в окружающую среду.

Проанализировав опыт эксплуатации газотурбинных установок (ГТУ), становится видно, что в процессах запуска и остановки газотурбинного агрегата выбросы природного газа в атмосферу складываются из:

- количества пускового газа для работы турбодетандера;
- количества газа затрачиваемого на продувку контура нагнетателя, которое составляет порядка 50-200 м³ в зависимости от типа нагнетателя;
- затрат импульсного газа, применяемого для работы технических кранов.

Количество пусков и остановок газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях зависит от следующего ряда причин:

- технического состояния агрегатов;
- технологических потребностей;
- требований завода-изготовителя ГПА.

Приблизительные значения выбросов природного газа при выполнении технологических операций по пуску и остановке ГПА представлены на рисунке 1.

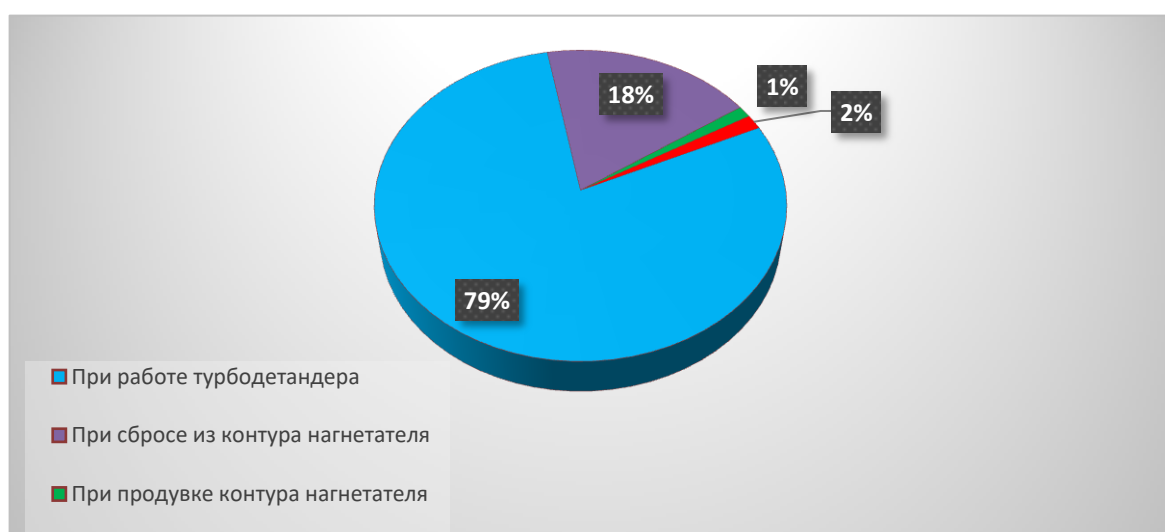


Рисунок 1. Процентное соотношение выбросов природного газа на ГПА

Как видно из рисунка 1, наибольшее количество выбросов природного газа, достигающее 98 %, происходят при работе турбодетандера и выбросах из контура нагнетателя.

Причиной значительных потерь природного газа при работе компрессорной станции является необходимость поддержания ее систем и объектов в состоянии работоспособности, в частности это относится к пылеуловителям. Порядка 7-10 млн м³ природного газа на компрессорных станциях затрачивается на продувку пылеуловителей. Величина потерь природного газа при продувках пылеуловителей, в основном, характеризуется технологическими схемами продувки. Схема продувки пылеуловителей может быть открытой или закрытой, вид продувки может

быть ручной или автоматический. Также на величину потерь влияют продолжительность продувки, частота продувки и рабочее давление природного газа в пылеуловителях. Необходимо заметить, что на продолжительность продувок и на частоту продувок пылеуловителей в большей степени влияет кондиционность газа, идущего по трубопроводам.

Постоянными и абсолютно неоправданными выбросами природного газа в окружающую среду на компрессорных станциях являются утечки газа через различные неплотности в узлах оборудования систем транспортировки природного газа: в резьбовых соединениях и фланцах, в сальниковых и иных уплотнениях запорной арматуры, в местах коррозионных дефектов металла. Последнее, как показывает практика, в большинстве случаев является причиной аварий на магистральных газопроводах, и как следствие, аварийных выбросов природного газа в атмосферу. Примерно 45 % от общего числа аварий на газопроводах составляют аварии по причине появления коррозионных дефектов в стенке трубопроводов.

Кроме загрязнений окружающей среды различными выбросами природного газа, загрязнения в не меньшей степени происходят благодаря вредным веществам, которые появляются в результате сгорания топлива (природного газа) в газоперекачивающих агрегатах и котельных, расположенных на большинстве компрессорных станций. В таких случаях к списку вредных веществ, сбрасываемых в окружающую среду, добавляются: углекислый газ, двуокись углерода, сажа, окислы азота и т.п. Если происходит сжигание газов, содержащих в своем составе сероводород (например, к таким газам относятся газы, добытые на оренбургских или астраханских месторождениях), то в дополнение к вышперечисленным вредным веществам выбрасываются в атмосферу сернистые и серные ангидриды и несгоревший сероводород. Необходимо подчеркнуть, что окислы азота, серы и углерода оказывают наиболее вредное влияние на атмосферный воздух.

Помимо вредных газовых выбросов в атмосферу, эксплуатация компрессорных станций подразумевает собой сбросы вредных загрязняющих веществ в наземные водоемы, подземные горизонты.

Применяемая вода на компрессорных станциях может быть подразделена по назначению на две части: производственная вода и хозяйственно-бытовая. Производственная вода применяется при эксплуатации котельных, различных теплообменников, для опрессовки оборудования, системы пожаротушения и т.п. Хозяйственно-бытовая вода используется для бытовых нужд работников станции, для мойки автотранспорта и т.п.

В таких условиях на компрессорной станции главными загрязняющими веществами сточных вод являются различные соли, метанол, остатки нефтепродуктов и бытовые отходы. Основными способами осуществления очистки сточных вод являются механический и биологический, производимые очистными сооружениями.

При строительстве и эксплуатации компрессорных станций загрязнение окружающей среды происходит различного рода производственными и твердыми бытовыми отходами. Производственными отходами на этапах строительства компрессорных станций являются древесина, шлам при проведении земляных работ, металлом и другие строительные отходы; при эксплуатации компрессорных станций – отработанное моторное масло, отходы очистных сооружений канализаций.

Шумовое загрязнение, создаваемое от работы газоперекачивающих агрегатов и воздушного транспорта обслуживания компрессорных станций, неблагоприятно воздействует на условия работы и жизни персонала, а также несет вред для существования животных и птиц вблизи компрессорных станций.

Совокупность вышеописанных негативных факторов, влияющих на окружающую среду, показывает важность и актуальность охраны

окружающей среды на всех этапах строительства, а также при эксплуатации компрессорных станций.

В рамках концепции энергосбережения особое внимание нужно сфокусировать на проблемах охраны окружающей среды при эксплуатации газоперекачивающих установок на компрессорных станциях. Очевиден тот факт, что при увеличении эффективности пользования газа на компрессорных станциях, внедрении технологий утилизации отходов, улучшении режимов эксплуатации газоперекачивающих агрегатов и качества их ремонтов будет происходить уменьшение негативных воздействий на окружающую среду.

В настоящее время, рассматривая количество установок, для примера можно взять ПАО «Газпром», которое обслуживает тысячи километров магистральных газопроводов, насчитывает более ста компрессорных станций и также имеет множество различных вспомогательных объектов. Все это является главными источниками огромного количества загрязняющих и вредных веществ, которые тем или иным образом попадают в окружающую среду. По приблизительным данным, количество загрязняющих веществ, попадающих в окружающую среду, составляет порядка 45-50 тысяч т, 98 % из них это жидкие и газообразные вещества, и лишь 2 % составляют твердые.

К жидким и газообразным веществам относятся:

- оксиды азота NO_2 ;
- оксиды серы SO_2 ;
- метан CH_4 ;
- окись углерода CO ;
- метанол;
- смазывающие масла и другие.

Следует отметить, что 85 % от общего количества вредных веществ составляют окись углерода и метан.

Основным компонентом твердых загрязняющих веществ на компрессорных станциях является зола, ее доля от общего количества составляет 80 %. К остальным 20 % относят сажу и различного рода пыли: древесная, металлическая, абразивная, силикатная и другие.

Главным значением для окружающей среды является разовая и среднесуточная предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ, попадающих в атмосферу. Наиболее высокотоксичными являются диоксиды и оксиды азота (токсичность диоксида азота в 7 раз выше токсичности оксида азота), далее идут оксиды серы, оксиды углерода, затем пыль, зола и сажа. Разовые и среднесуточные предельно допустимые концентрации некоторых загрязняющих веществ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Разовые и среднесуточные значения ПДК для загрязняющих веществ

Загрязняющее вещество	Разовая концентрация, мг/м ³	Среднесуточная концентрация, мг/м ³
Диоксид азота NO ₂	0,850	0,040
Оксид азота NO	0,600	0,060
Оксид углерода CO	5,00	1,00
Оксид серы SO ₂	0,5	0,005

Так как процесс сгорания топлива является главной причиной выбросов окислов азота в атмосфере, то важной задачей по сокращению такого рода выбросов является внедрение улучшенных технологические процессов, которые впоследствии приведут к снижению выбросов вредных веществ в атмосферу.

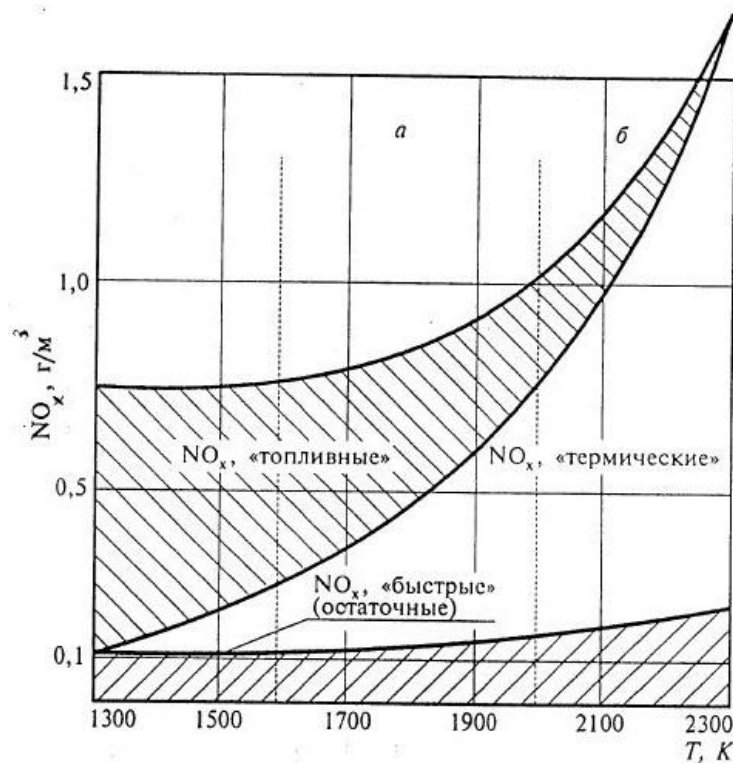
Как показывают исследования различных авторов, выбросы токсичных веществ при сгорании топлива, в том числе окислов азота, в атмосферу происходят по трем направлениям: «термические», «топливные» и «быстрые».

«Термические» окислы азота происходят именно в ореоле горения топливного газа, как следствие реакции с выделением теплоты высокой температуры окисления азота свободным атмосферным кислородом:



Образование термических окислов азота повышается с увеличением температуры в зоне сгорания, а также с повышением концентрации кислорода.

При температуре менее 1400 К соединений азота в продуктах сжигания практически не наблюдается. При температуре приблизительно равной 1800 К количество азотных соединений достигает 2 г/м³, а при температурах 1800-2100 К – 4-5 г/м³, что многократно превышает среднесуточную ПДК оксида азота (0,060 мг/м³). Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что температура оказывает значительное влияние на количество образования оксидов азота (рисунок 2).



а – низкосортные виды топлива; б – природный газ, керосин

Рисунок 2. Схема зависимости образования оксидов азота от температуры сгорания топлива

«Быстрые» оксиды азота появляются при температурах ниже 950 К на фронтальных участках пламени. Их образование составляет приблизительно 110-130 мг/м³, и оно не зависит от коэффициента избытка воздуха. Определение «быстрые» было получено благодаря малому времени образования оксидов, так как оно происходит в начальных зонах пламени. К примеру, при температурах 300-400 К образование «быстрых» оксидов происходит значительно быстрее, чем «термических».

«Топливные» оксиды происходят из азотных соединений топлива на начальных этапах горения факела в одно время с «быстрыми», но перед образованием «термических» оксидов. Процесс образования «топливных» оксидов азота берет начало при температуре 900-1000 К и образование увеличивается при увеличении коэффициента избытка воздуха.

При температуре менее 2000 К в составе продуктов сгорания имеются все три типа оксидов азота, при температуре более 2000 К главным образом образуются только «термические».

В диапазоне температур, при которых происходят процессы сжигания топлива в камерах сгорания газотурбинных установок (1500-2000 К), общий выход оксидов азота суммируется из количества «топливных», «быстрых» и «термических» оксидов. При сгорании природного газа в области высоких температур первостепенным является влияние «термических» оксидов азота.

На рисунке 3 представлена зависимость изменения концентраций NO₂ и NO в продуктах сгорания метана от расстояния факела до горелки (X). По вертикальной оси отложены концентрации NO₂ и NO в ppm, что означает отношение числа молекул азотных соединения к миллиону молекул воздуха. Для NO₂ ppm равен 1,3 мг/м³, а для NO₁ ppm равен 2 мг/м³.

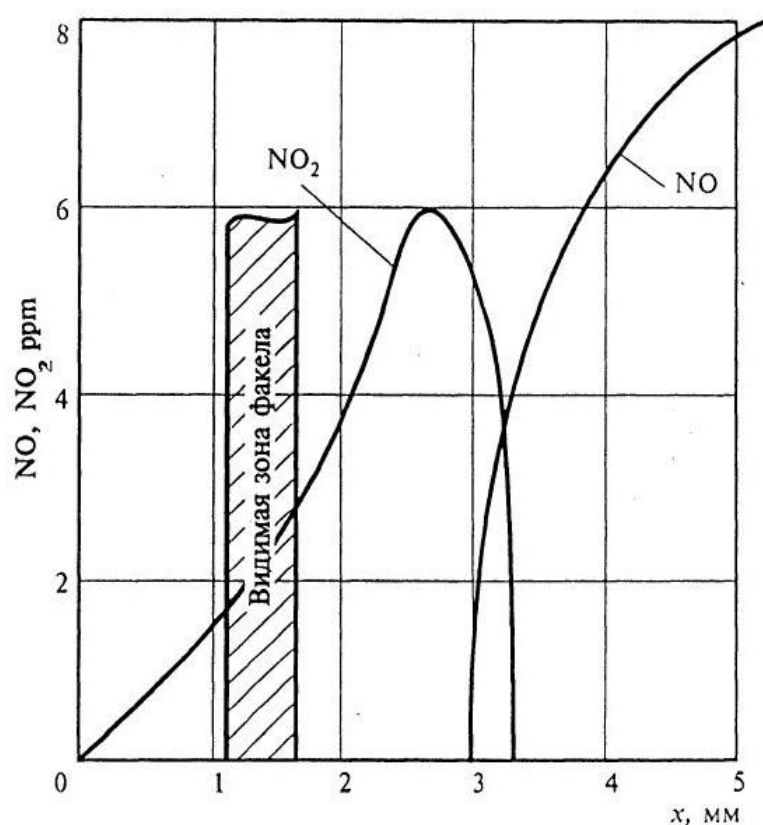


Рисунок 3. Зависимость концентраций оксидов азота от расстояния от горелки в продуктах сгорания метана

Огромное влияние на выход NO при горении топливного газа имеют тепловое напряжение камер сгорания q и коэффициент избытка воздуха α , что наглядно видно из рисунка 4. При значениях $\alpha = 1,20-1,30$ происходит максимальный выход оксидов азота. Содержание NO повышается при увеличении теплового напряжения в камере сгорания q , и в сторону больших значений α перемещается экстремум. Если увеличить значение α до 1,50, то будет наблюдаться снижение образования оксидов азота в 2-3 раза относительно уровня при $\alpha = 1,20-1,30$.

Турбулентность потока и характер распределения температур по длине факела также оказывают большое влияние на образование оксидов азота. Таким образом, если используются вихревые горелки с температурой факела и турбулентностью потока, превышающие соответствующие значения прямоточных горелок, то по причине закручивания потоков топлива в 1,6-2,0 раза имеет место увеличение выхода оксидов азота практически в 2,5 раза.

Снизить пульсации потока, а значит и концентрацию оксидов азота, можно путем увеличения времени предварительного смешения топлива и окислителя, тем самым повысится качество подготовки смеси.

Сравнивая горелки вихревого и диффузионного типов можно оказать предпочтение вторым, поскольку возгорание топлива здесь происходит на расстоянии от сопла, что приводит к увеличению зоны горения, а значит температура окажется ниже из-за увеличения теплообмена. В горелках диффузионного типа концентрация оксидов азота значительно ниже.

Следует отметить, что температура воздуха, участвующего в процессе горения, также имеет большое значение на выход оксидов азота.

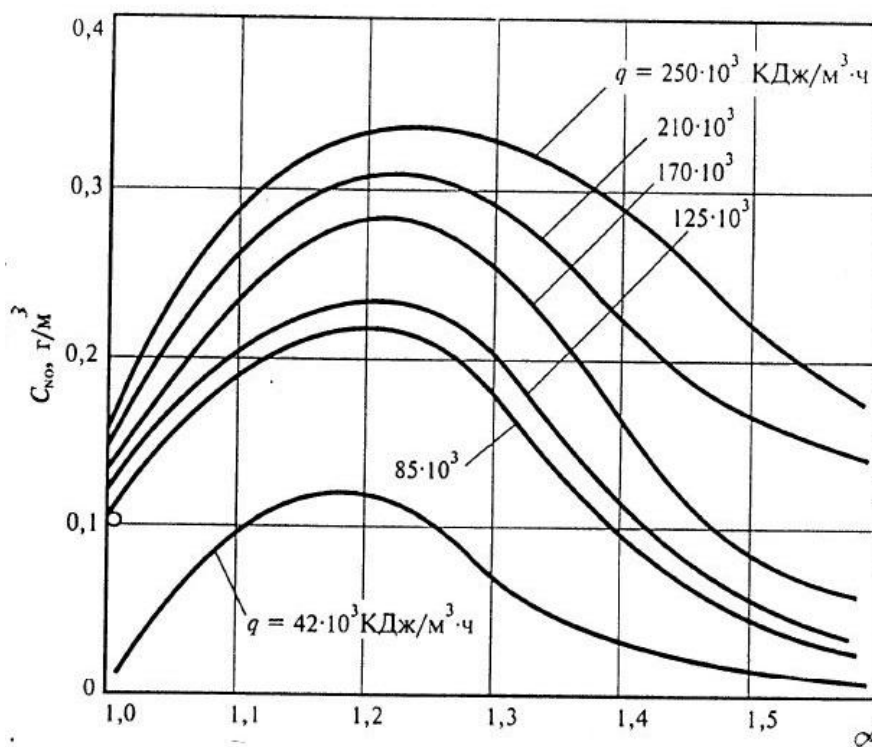


Рисунок 4. Зависимость концентрации оксида азота в дымовых газах от коэффициента избытка воздуха при различных значениях тепловых напряжений

Рассмотрим случай, когда воздух предварительно подогревают со 180°C до 328°C , это приводит к увеличению оксидов азота на выходе практически в три раза, при этом скорость образования оксидов азота сокращается, а расстояние образования уменьшается в два раза.

Кроме того, нельзя не отметить, что наличие свободного кислорода и низких температур после процесса образования двухвалентного оксида азота может произойти следующая реакция с выходом тепла:



Однако при не достижении температуры равной 500 °С уравнение (2) сдвигается вправо. Если относить это к практике, а именно к условиям работы газотурбинных установок на компрессорных станциях, то отметим, что при достаточно низких температурах дымовых газов после турбины низкого давления происходит образование четырехвалентного оксида азота. Это можно подтвердить, если провести наблюдение за дымовыми газами, выходящими после ГТУ, которые имеют желтый, а иногда и бурый цвет, что свидетельствует о содержании в них NO_2 , так как NO не имеет цвета. Следует отметить, что солнечный свет может привести к образованию NO_2 из оксида азота, находящегося в атмосфере. Если опираться на уравнения (1) и (2), можно отметить, что NO является главным источником образования четырехвалентного оксида азота в атмосфере и дымовых газах. Причина возникновения NO – окисление азота, содержащегося в атмосфере, а также топлива с азотными соединениями. Азотосодержащие соединения, как правило, в природном газе находятся в незначительных количествах, тогда основным источником образования оксида азота остается все-таки окисление азота, содержащегося в атмосфере.

Другим загрязняющим газом, находящимся в продуктах сгорания, является оксид углерода, на количество которого влияют коэффициент избытка воздуха и тепловое напряжение в камере сгорания (рисунок 5).

Если коэффициент избытка воздуха равен 1,4 в камере сгорания при различных значениях теплового напряжения, то концентрация оксида углерода CO минимальная. При увеличении значения коэффициента избытка воздуха (приблизительно 1,5) происходит рост концентрации оксида углерода, который увеличивается примерно на 40 %.

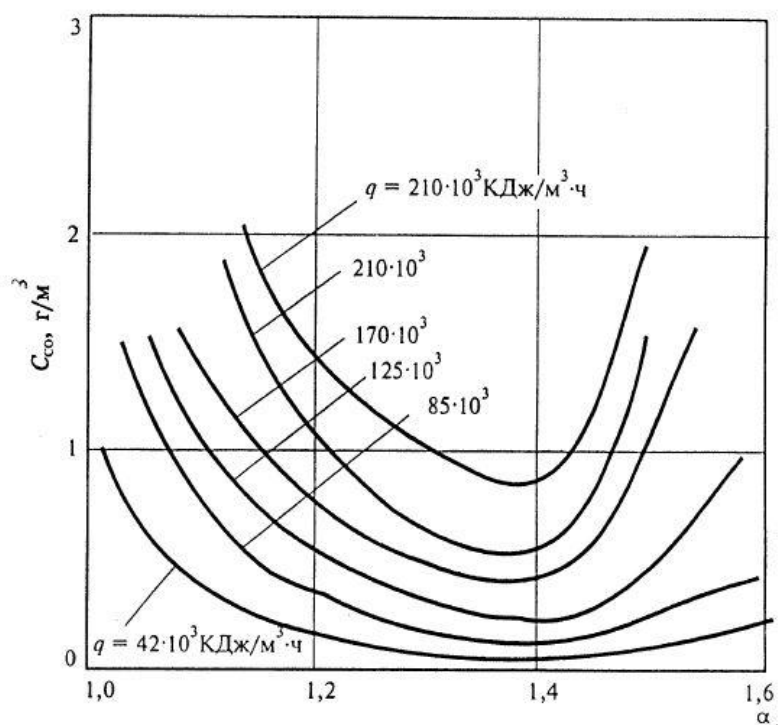


Рисунок 5. Соотношение оксида углерода в зависимости от коэффициента избытка воздуха в зоне горения при изменении значений тепловых напряжений

Выводы

Опираясь на вышесказанное, опишем следующие методы, которые снизят образование загрязняющих выбросов и, главное, оксидов азота:

- введение рециркуляции дымовых газов к центральным горелкам;
- выравнивание в блочных камерах сгорания температур факела, что приведет к снижению максимальных местных температур в области горения;
- осуществление предварительного смешения окислителей топлива, что приведет к снижению градиента температуры в области горения;
- реконструкция камеры сгорания газотурбинной установки путем создания многоступенчатого процесса сгорания топлива, что приведет к сокращению количества кислорода в области максимальных температур и снижению самой максимальной температуры;
- модернизация системы горелок в камере сгорания газотурбинной установки.

Список использованных источников

1 Ишков А. Г., Хворов Г. А., Юмашев М. В., Юров Е. В., Ешич Л. К. Современное состояние и перспективное развитие направлений энергосбережения в транспорте газа // Газовая промышленность. 2010. № 9. С. 36-39.

2 Козаченко А. Н., Никишин В. И., Поршаков Б. П. Энергетика трубопроводного транспорта газов: учеб. пособие. М.: ГУН Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001. 400 с.

3 Карасевич А. М., Сухарев М. Г., Белинский А. В., Тверской И. В., Самойлов Р. В. Энергоэффективные режимы газотранспортных систем и методы их обеспечения // Газовая промышленность. 2012. № 1. С. 30-34.

4 Григоров В. П. Исследование органов перепуска в поршневых вакуум-компрессорах: Дис. канд. тех. наук. М., 1970. 243 с.

5 Пластинин П. И. Поршневые компрессоры. Т. 1. Теория и расчет. М.: Изд-во «Колосс», 2000. 456 с.

References

1 Ishkov A. G., Khvorov G. A., Yumashev M. V., Yurov E. V., Eshich L. K. Sovremennoe sostoyanie i perspektivnoe razvitie napravlenii energosberezheniya v transporte gaza // Gazovaya promyshlennost'. 2010. № 9. S. 36-39. [In Russian].

2 Kozachenko A. N., Nikishin V. I., Porshakov B. P. Energetika truboprovodnogo transporta gazov: ucheb. posobie. M.: GUN Izd-vo «Neft' i gaz» RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2001. 400 s. [In Russian].

3 Karasevich A. M., Sukharev M. G., Belinskii A. V., Tverskoi I. V., Samoilov R. V. Energoeffektivnye rezhimy gazotransportnykh sistem i metody ikh obespecheniya // Gazovaya promyshlennost'. 2012. № 1. S. 30-34. [In Russian].

4 Grigorov V. P. Issledovanie organov perepuska v porshnevnykh vakuum-kompressorakh: Dis. kand. tekhn. nauk. M., 1970. 243 s. [In Russian].

5 Plastinin P. I. Porshnevye kompressory. T. 1. Teoriya i raschet. M.: Izd-vo «Koloss», 2000. 456 s. [In Russian].

Сведения об авторе

About the author

Зорина С. А., магистрант гр. ММО31-16-01, ФГБОУ ВО «УГНТУ»,
г. Уфа, Российская Федерация

S. A. Zorina, Undergraduate Student of MМО31-16-01 Group, FSBEI HE
«USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: zorina.sofia@yandex.ru