

К ВОПРОСУ ВЫДЕЛЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ГАЗОТУРБИННОЙ ТЕПЛОВЕНТИЛЯЦИОННОЙ ТОННЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

Лаврентий Александрович Кияница

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: Lavrentij.Kijanitz@yandex.ru

Ольга Александровна Куликова

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, студент, тел. (913)936-25-86, e-mail: olatennis@211.ru

При эксплуатации газотурбинных двигателей в качестве тепловентиляционных установок для протяженных железнодорожных тоннелей в условиях резко-континентального климата Сибири и Дальнего востока существует проблема выбросов вредных веществ, таких как окислы азота, оксид углерода, сажа, во внутренний объем тоннеля вместе с нагретым воздухом. В данном исследовании определены параметры работы газотурбинной установки на базе турбореактивного двигателя Д-36, использующей в качестве топлива сжиженный углеводородный газ, и проведен анализ выбросов вредных веществ для двух характерных режимов работы установки. Выявлено, что концентрация окислов азота в вентиляционной струе от установки, работающей в крейсерском режиме, не превышает нормы ПДК для железнодорожных тоннелей. Определены параметры воздуха, подаваемого в тоннель, при разбавлении вентиляционной струи от двигателя с повышенным содержанием окислов азота наружным воздухом до уровня ПДК.

Ключевые слова: железнодорожный тоннель, двухконтурный турбореактивный двигатель, тепловентиляционная установка, вредные вещества.

TO DETERMINATION OF THE QUANTITY OF DANGEROUS GASES IN A GAS TURBINE HEAT-VENTILATION TUNNEL INSTALLATION

Lavrenty A. Kiyantsa

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 179, e-mail: Lavrentij.Kijanitz@yandex.ru

Olga A. Kulikova

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Student, phone: (913)936-25-86, e-mail: olatennis@211.ru

There is the emission problem of hazardous substances such as nitrogen oxides, carbon oxide and soot into inner space of tunnel with heated air while using of gas-turbine engines as heat ventilating equipment for long railway tunnels in conditions of harsh continental climate of Siberian and Far East. In the investigation working parameters of gas-turbine equipment based on jet engine D-36 is determined. The analysis of hazardous substance emissions for two specific working modes is carried out. It is educed that the concentration of nitrogen oxides located at ventilating flow from the equipment, working at nominal mode, do not exceed standards of maximal permissible concen-

trations for railway tunnels. Parameters of the surrounding air, discharged into the tunnel, for dilution of ventilating flow with high content of nitrogen oxides to standard of MPC is determined.

Key words: railway tunnel, double-circuit jet engine, heat ventilating equipment, hazardous substances.

Введение

Одной из основных проблем эксплуатации протяженных железнодорожных тоннелей в условиях резко-континентального климата Сибири и Дальнего востока (к примеру, Северо-Муйского тоннеля) является наледообразование на внутренних конструкциях тоннеля [1,2]. Наледообразование происходит при прохождении поезда по тоннелю из-за поступления холодного воздуха снаружи и теплозатрат на нагрев состава [2, 3], при этом припортальные калориферные установки прогревают воздух только на небольшом удалении от порталов тоннеля. На центральном участке тоннеля образуются наледи и сосульки, которые приходится сбивать вручную, что снижает пропускную способность тоннеля [2]. В работах [1,4,5] проведено обоснование применения конвертируемого турбореактивного авиадвигателя Д-36 в качестве тепловентиляционной установки (ТВУ) для обогрева тоннелей. В качестве топлива предлагается использовать сжиженный углеводородный газ – СУГ (физические свойства и состав согласно [6]). Так как СУГ, в отличие от авиационного топлива, не имеет в своем составе связанного азота, величина выбросов окислов азота снижается в 1,5-2 раза [7].

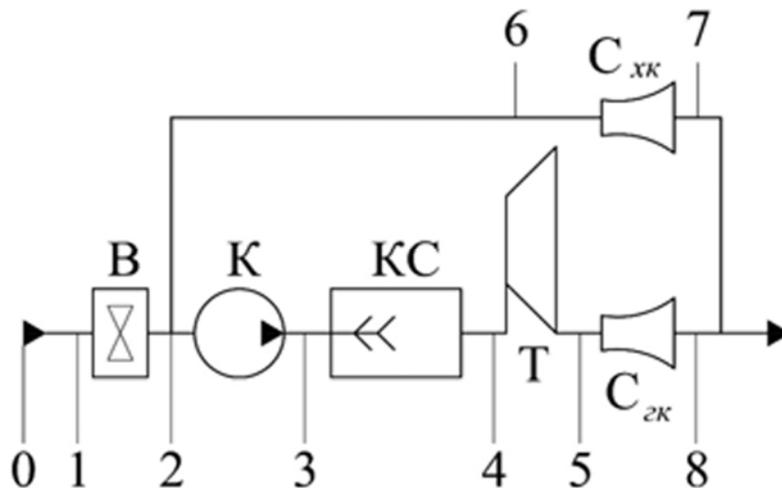
Конвертация и дальнейшее использование авиационных двигателей на энергетических объектах является распространенной практикой в РФ и за рубежом [8-12]. С точки зрения снижения выбросов вредных веществ, таких как окислы азота (NO), оксид углерода (CO) и сажа, конвертация ГТУ заключается в переоборудовании камеры сгорания (КС) для работы на природном газе или на СУГ, изменении конструкции КС (малоинерционные КСи т.д.) [13], снижении температуры газов в камере сгорания [14-16]. Также, эффективными методами по борьбе с окислами азота являются впрыск пара или водяной эмульсии в камеру сгорания, использование катализаторов [7, 13]. Наиболее вредными веществами, обладающими самыми низкими предельно допустимыми концентрациями (ПДК), применительно к ГТУ являются окислы азота. Согласно [17], ПДК для железнодорожных тоннелей составляет $e_{NO, ПДК} = 5 \text{ мг/м}^3$.

При подаче смеси воздуха из внешнего контура и продуктов сгорания из внутреннего контура турбореактивного двигателя вредные вещества попадают в тоннель. Концентрации этих веществ необходимо обеспечивать не выше ПДК при эксплуатации ТВУ. Для этого необходимо определить величины выбросов вредных веществ для различных режимов эксплуатации газотурбинной установки (ГТУ) и обосновать способы снижения концентраций NO, CO и сажи до уровня ПДК.

Методы исследований

Авиационный двигатель может работать в нескольких режимах, в частности, на номинальном и крейсерском. Главное отличие данных режимов заключается в различной тяге R , кН. На крейсерском режиме (К) она составляет 16 кН, на номинальном (Н) – 50 кН. В качестве тепловентиляционной установки для обеспечения теплового режима железнодорожного тоннеля двигатель может использоваться как на крейсерском, так и на номинальном режимах.

Для определения количества вредных выбросов при использовании турбореактивного двухконтурного двигателя в качестве тепловентиляционной установки для обеспечения теплового режима в тоннеле, необходимо произвести термодинамический расчёт двигателя [18]. Исходными данными для термодинамического расчёта ТРДД является тяга R , степень двухконтурности m , степень повышения давления воздуха во внутреннем контуре $\pi^*_{к\Sigma}$, степень повышения давления воздуха в наружном контуре (в вентиляторе) $\pi^*_{влп}$, температура перед турбиной $T^*_г$ [18, 19]. Так как ранее было показано, что при использовании в качестве топлива СУГ количество окислов азота значительно меньше, чем при сжигании керосина, то расчет проведен только для СУГ (марка ПБТ – пропан-бутан технический согласно [6]) с низшей теплотой сгорания 46,917 МВт/кг. Расчёт проведен при разных температурах окружающего воздуха по методике [18]. К расчету принят двухконтурный турбореактивный двигатель Д-36 [19], декомпозиционная схема с характерными точками, в которых определяются термодинамические параметры газового и воздушного потоков, показана на рисунке.



Декомпозиционная схема Д-36:

В – вентилятор, К – компрессор, КС – камера сгорания, Т – турбина, $C_{зк}$ – сопло внутреннего контура, $C_{хк}$ – сопло внешнего контура, 0 – начальные условия, 1 – вход в вентилятор, 2 – выход из вентилятора, 3 – вход в камеру сгорания, 4 – вход в турбину, 5 – вход в сопло внутреннего контура, 6 – вход в сопло внешнего контура, 7 – выход из сопла внешнего контура, 8 – выход из сопла внутреннего контура

Расчет объемных концентраций вредных выбросов проведен по методике [20]. Эмиссия вредных веществ EI_i , г/кг, зависит от удельной тяги $r = R/R_{\max}$ и определяется по графическим зависимостям в [20]. Количество сжигаемого топлива Q , кг/ч, определяется по формуле:

$$Q = R \cdot q, \quad (1)$$

где R – тяга двигателя, Н; q – удельный расход топлива, кг/(ч·Н).

Количество выбросов каждого i -ого вредного вещества E_i определится во формуле:

$$E_i = EI_i \cdot Q. \quad (2)$$

Объемная концентрация каждого i -ого вредного вещества e_i , мг/м³, определится как:

$$e_i = E_i / V, \quad (3)$$

где V – объемный расход воздуха и газов от ГТУ, м³/ч.

Количество свежего наружного воздуха V_n , м³/ч, подмешиваемого в газоздушную струю от ГТУ, для снижения концентрации вредных выбросов, определяется как:

$$V_n = \frac{(e_i - e_{i, \text{ПДК}})}{e_{i, \text{ПДК}}} \cdot V_{\text{ГТУ}}, \quad (4)$$

где $e_{i, \text{ПДК}}$ – ПДК вредного вещества, мг/м³, $V_{\text{ГТУ}}$ – объемный расход газоздушной смеси от ГТУ, м³/ч.

Температура газоздушной смеси от ГТУ $t_{\text{ГТУ}}$, °С, ее теплоемкость $c_{\text{ГТУ}}$, Дж/(кг·°С), определяется по формулам:

$$t_{\text{ГТУ}} = \frac{G_{\text{ХК}} \cdot c_{\text{ХК}} \cdot t_{\text{ХК}} + G_{\text{ЗК}} \cdot c_{\text{ЗК}} \cdot t_{\text{ЗК}}}{G_{\text{ХК}} \cdot c_{\text{ХК}} + G_{\text{ЗК}} \cdot c_{\text{ЗК}}}, \quad (5)$$

$$c_{\text{ГТУ}} = \frac{G_{\text{ХК}} \cdot c_{\text{ХК}} + G_{\text{ЗК}} \cdot c_{\text{ЗК}}}{G_{\text{ХК}} + G_{\text{ЗК}}}, \quad (6)$$

где $G_{\text{ХК}}$, $c_{\text{ХК}}$, $t_{\text{ХК}}$ – соответственно массовый расход, кг/с, теплоемкость, Дж/(кг·°С), и температура, °С, во внешнем контуре ГТУ, $G_{\text{ЗК}}$, $c_{\text{ЗК}}$, $t_{\text{ЗК}}$ – то же, во внутреннем контуре ГТУ.

Температура смеси наружного воздуха и потока от ГТУ $t_{\text{см}}$, °С, определится как:

$$t_{\text{см}} = \frac{G_{\text{ГТУ}} \cdot c_{\text{ГТУ}} \cdot t_{\text{ГТУ}} + G_n \cdot c_n \cdot t_n}{G_{\text{ГТУ}} \cdot c_{\text{ГТУ}} + G_n \cdot c_n}, \quad (7)$$

где $G_{\text{ГТУ}} = G_{\text{ХК}} + G_{\text{ЗК}}$, кг/с; G_n , c_n , t_n – соответственно массовый расход, кг/с, теплоемкость, Дж/(кг·°С), и температура, °С, наружного воздуха.

Теплоемкости воздуха и продуктов сгорания от ГТУ для различных температур определены согласно [21, 22].

Для предотвращения обмерзания внутренних поверхностей тоннеля, t_{cm} должна быть положительной.

Результаты

Проведен расчет термодинамических параметров работы авиационного двухконтурного двигателя Д-36 на крейсерском (К) и на номинальном (Н) режимах. Расчет сведен в табл. 1. Характерные точки 0...8 приведены на рисунке.

Таблица 1

Термодинамический расчет двигателя Д-36

Точка		0	1	2	3	4	5	6	7	8
К	Т, К	233	233	251	401	1253	1013	251	237	875
	Р, Па	93325	92390	116400	933200	905200	352500	115200	93325	93325
Н	Т, К	233	233	263	472	1510	1152	263	239	995
	Р, Па	93325	92390	134000	1866000	1810000	541200	132600	93325	93325

При этом расходы во внутреннем и наружном контурах составили:

– в крейсерском режиме: $G_{xk}=59,1$ кг/с, $G_{zk}=10,5$ кг/с;

– в номинальном режиме: $G_{xk}=151,8$ кг/с, $G_{zk}=27,1$ кг/с.

В табл. 2 приведены расчетные данные для двух режимов работы ГТУ по количеству образующихся вредных веществ – таких как окислы азота NO, оксид углерода CO и сажа. В табл. 3 приведены объемные концентрации NO, CO и сажи для двух режимов эксплуатации ГТУ. Согласно [17], ПДК оксида азота и сажи составляет 5 мг/м³, а оксида углерода – 150 мг/м³. Видно, что уровень ПДК превышает только концентрация оксидов азота.

Таблица 2

Валовые выбросы NO, CO и сажи

	R, кН	R _{max} , кН	r	q, кг/(ч·Н)	Q, кг/ч	EI _{NO} , г/кг	EI _{CO} , г/кг	EI _{сажа} , г/кг	E _{NO} , кг/ч	E _{CO} , кг/ч	E _{сажа} , кг/ч
К	16	65	0,25	0,0375	600	8,62	17,47	0,1	5,17	10,48	0,06
Н	50	65	0,77	0,0375	1875	26,94	0	0	50,51	0	0

Таблица 3

Объемные концентрации NO, CO и сажи

	V _{ГТУ} , м ³ /ч	e _{NO} , мг/м ³	e _{CO} , мг/м ³	e _{сажа} , мг/м ³
К	249653	18	35	0,2
Н	689756	62	0	0

Определим объёмный расход свежего наружного воздуха, который необходимо подмешать к расходу газозвушной смеси от ГТУ, чтобы снизить концентрацию окислов азота до уровня ПДК. Расчетные данные приведены в табл. 4.

Таблица 4

Необходимые расходы свежего воздуха для снижения концентрации окислов азота до уровня ПДК

	$V_{ГТУ}, \text{м}^3/\text{ч}$	$e_{NO}, \text{мг}/\text{м}^3$	$e_{NO, ПДК}, \text{мг}/\text{м}^3$	$V_n, \text{м}^3/\text{ч}$
К	249653	18	5	649098
Н	689756	62	5	7863217

Температура струи от ГТУ и смеси, подаваемой в тоннель, определены по формулам (5) и (7). Расчет проведён в табличной форме (табл. 5, 6).

Таблица 5

Температуры струи от ГТУ

	$G_{xk}, \text{кг}/\text{с}$	$G_{zk}, \text{кг}/\text{с}$	$c_{xk}, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$c_{zk}, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$t_{xk}, ^\circ\text{C}$	$t_{zk}, ^\circ\text{C}$	$C_{ГТУ}, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$t_{ГТУ}, ^\circ\text{C}$
К	10,5	59,1	1005	1214	-36	602	1037	77
Н	27,1	151,8	1005	1245	-34	722	1041	103

Таблица 6

Температуры смеси от ГТУ и наружного воздуха

	$t_{ГТУ}, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	$c_{ГТУ}, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$c_n, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$	$G_{ГТУ}, \text{кг}/\text{с}$	$G_n, \text{кг}/\text{с}$	$t_{см}, ^\circ\text{C}$
К	77	-40	1037	1005	69,6	119,7	3,8
Н	103	-40	1041	1005	178,9	1449,9	-23,8

Обсуждение

Как видно из расчетов, температура воздуха, подаваемого в тоннель для предотвращения обмерзания, с концентрацией NO не выше ПДК имеет положительную температуру только в случае работы двигателя в крейсерском режиме. Данная температура, равная плюс 3,8 $^\circ\text{C}$, получена для температуры наружного воздуха минус 40 $^\circ\text{C}$. Очевидно, что при повышении наружной температуры температура вентиляционной струи, подаваемой в тоннель, будет расти.

Работа ГТУ на номинальном режиме нерациональна, так как повлечет за собой увеличение эмиссии окислов азота вследствие увеличения температуры в камере сгорания. Для снижения концентрации окислов азота необходимо будет подавать значительно больше наружного воздуха, что вызовет переохлаждение вентиляционной струи. Так, для наружной температуры минус 40 $^\circ\text{C}$,

температура воздуха, подаваемого в тоннель, составит минус 23,8°С. Однако, при эксплуатации на крейсерском режиме, в отличие от эксплуатации на номинальном, существует проблема недожога топлива, что сопровождается дополнительными выбросами оксида углерода СО и сажи. Но выбросы СО и сажи на крейсерском режиме не превышают уровня ПДК.

Заключение

В данной работе обосновано использование ГТУ на крейсерском режиме для обогрева железнодорожных тоннелей вентиляционной струей, состоящей из смеси газоздушного потока от ГТУ и наружного воздуха. При этом концентрации вредных выбросов не превышают нормируемые значения для железнодорожных тоннелей.

Благодарности

Данная статья написана по результатам исследований, приведённых в рамках проекта ФНИ, номер гос.регистрации АААА-А17-117091320027-5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красюк А. М., Лугин И. В., Куликова О. А. О применении двухконтурного турбореактивного двигателя для обеспечения теплового режима железнодорожных тоннелей в суровых климатических условиях // ГИАБ. – М., 2018. – № 2. – С. 103–110.
2. Лугин И. В., Витченко А. А. Поддержание требуемого температурного режима в северо-муйском тоннеле в холодный период года средствами тоннельной вентиляции // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – Новосибирск : ИГД СО РАН, 2014. – т. 1. – № 1. – С. 210–214.
3. Лугин И. В., Куликова О. А. Влияние конструктива вагонов и вида перевозимого груза товарного состава на процессы теплообмена в протяженных железнодорожных тоннелях в холодный период года // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – Новосибирск : ИГД СО РАН, 2017. – т. 4. – № 1. – С. 136-141.
4. Куликова О. А., Лугин И. В. Влияние топлива на эффективность использования турбореактивного двигателя в качестве тепловентиляционной установки в тоннеле // Наука. Промышленность. Оборона, труды XVII Всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск : НГТУ, 2016. – С. 294–297.
5. Красюк А. М., Лугин И. В., Куликова О. А. Исследование термодинамических процессов в теплообменнике при использовании турбореактивного двигателя для подогрева воздуха в железнодорожном тоннеле // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 5. – С. 91–95.
6. ГОСТ Р 52087-2018. Газы углеводородные сжиженные топливные. Технические условия [Текст] : дата введ. 29.03.2018. – М.: [б.и.], 2018. – 24 с.
7. Постников А. М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ. Издательство Самарского научного центра РАН, 2002 г. – 286 с.

8. Ковецкий В.М., Ковецкая Ю.Ю. Газотурбинные двигатели в энергетике: достижения, особенности, возможности // Проблемы загальной энергетики. – Киев, 2018. – № 17. – С. 24-30.

9. Махнутин А. К., Кавалеров Б. В. О вопросах применения газотурбинных установок и парогазовых установок в энергетике // Вестник ПНИПУ. – Пермь, 2015. – №15. – с. 84-96.

10. Иванов И. В., Струговец С. А., Чечулин А. Ю. Перспективы использования газотурбинных технологий в энергетике России // Вестник УГАТУ. – Уфа : УГАТУ, 2009. – т. 13. – №1 (34). – С. 26-31.

11. Скиба М. В. Тенденции развития рынка газотурбинных установок // Вестник Самарского государственного университета. Серия «экономика и управление». – 2015. – № 9/2 (131). – С. 156-164.

12. Китенко С. Р., Беклемишев П. О. Применение газотурбинных установок в энергетике России // Молодежный научный вестник. – 2017. – № 8(21). – с. 105-110; URL: http://www.mnvnauka.ru/2017/08/08_2017.pdf (дата обращения: 18.03.2019).

13. Гриценко Е. А., Данильченко В. П., Лукачев С. В., Резник В. Е., Цыбизов Ю. И. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения – Самара : СНЦ РАН, 2004. – 266 с.: ил.

14. Ионин А. А. Газоснабжение: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1989. – 439 с.: ил.

15. Стаскевич Н. Л., Вигдорчик Д. Я. Справочник по сжиженным углеводородным газам. – Л.: Недра, 1986. – 543 с.

16. Стаскевич Н. Л., Северинец Г. Н., Вигдорчик Д. Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.

17. СП 122.13330.2.12. Тоннели железнодорожные и автодорожные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-2097 [Текст] : утв. Приказом Минрегион РФ 30.06.2012 : дата введ. 01.01.2013. — М.: [б.и.], 2012. — 132 с.

18. Шулекин В. Т., Медведев В. В. Теория авиационных двигателей. Часть 2. Газодинамический расчёт двухконтурных турбореактивных двигателей воздушных судов гражданской авиации // Моск. гос. тех. ун-т. гражд. ав-ции. Москва, 2008. – 93 с.

19. Киселев Ю. В., Тиц С. Н. Конструкция и техническая эксплуатация двигателя Д-36: учеб. пособие / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2006. – 90 с.

20. Асатуров М. Л. Загрязнение окружающей среды при авиатранспортных процессах: учеб. пособие / Санкт-петербург. гос. ун-т гражданской авиации, СПб, 2010. – 94 с.

21. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1972. – 721 с.

22. Каня Я. Н., Бурцев В. В. Тепломассобмен : пособие. – Новосибирск. – 292 с.

© Л. А. Кияница, О. А. Куликова, 2019