
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ



УДК 533.6.011

DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.5

О. А. БАЛАНДИНА
С. М. ПУРИНГ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА УРОВЕНЬ ВЫДЕЛЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

RESEARCH OF INFLUENCE OF AIR TEMPERATURE
ON THE LEVEL OF NITROGEN OXIDES IN SMOKE GASES
OF BOILER PLANTS

Выполнен анализ значений концентраций образующихся оксидов азота и температур факела струи при различных условиях смесеобразования. Получены и проанализированы графики распределения температур факела и концентраций оксида азота в расчетной области для температур окислителя 20, 60, 100, 150 и 200 °С. Математическое моделирование процесса горения газообразного топлива проводилось с помощью программного комплекса FlowVision. Анализ результатов показал, что уменьшение температуры подаваемого в качестве окислителя воздуха приводит к значительному падению концентрации оксидов азота в дымовых газах, при этом не оказывая существенного влияния на изменение температуры факела. Результаты исследований могут быть использованы при решении задач оптимизации котельных установок, с целью снижения вредных выбросов дымовых газов. Планируется проведение дальнейшего моделирования для выявления зависимости влияния различных факторов на степень образования оксидов азота в уходящих газах котельных установок.

Ключевые слова: численный расчет, моделирование, температурное поле, поле концентраций, оксиды азота, оптимизация

Повышение объема потребления энергии и тепла приводит к увеличению вредных выбросов, загрязняющих окружающую среду. Атмосферные выбросы котельных, работающих на газообразном топливе, содержат оксиды углерода, азота и диоксид углерода [1].

The analysis of the values of the concentrations of the formed nitrogen oxides and the temperatures of the jet plume under various conditions of mixture formation is carried out. The plots of the distribution of torch temperatures and concentrations of nitric oxide in the calculated area for oxidizer temperatures of 20, 60, 100, 150, and 200 °C were obtained and analyzed. Mathematical modeling of the gaseous fuel combustion process was carried out using the FlowVision software package. An analysis of the results showed that a decrease in the temperature of the air supplied as an oxidizing agent leads to a significant decrease in the concentration of nitrogen oxides in flue gases, while not significantly affecting the change in the flame temperature. The research results can be used to solve the problems of optimizing boiler plants, in order to reduce harmful flue gas emissions. Further modeling is planned to determine the dependence of the influence of various factors on the degree of formation of nitrogen oxides in the flue gases of boiler plants.

Keywords: numerical calculation, modeling, temperature field, concentration field, nitrogen oxides, optimization

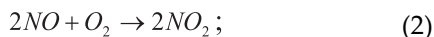
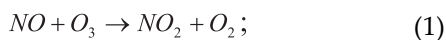
Вопрос снижения концентрации наиболее токсичного из компонентов дымовых газов котельных – оксида азота на данный момент является актуальным, особенно для районов сосредоточения большого количества энергетических установок.

Согласно Государственному докладу «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году» в 50 городах России среднегодовая концентрация диоксидов азота превышает 1 ПДК по данным Росгидромета [2]. Ощутимую роль в части поступления в атмосферу оксида азота играют предприятия по обеспечению теплоснабжения и электрической энергии.

В результате соединения азота с кислородом, в зависимости от степени окисления образуются азотный ангидрид N_2O_3 , тетраоксид диазота N_2O_4 , азотистый ангидрид N_2O_5 , геммоксид N_2O , диоксид NO_2 , оксид NO . Практическое значение с экологической точки зрения представляют NO и NO_2 .

В процессе сжигания природного газа в основном образуется оксид азота NO . Дальнейшее окисление NO до более токсичного NO_2 происходит в шлейфе дымовых газов [1].

Механизм окисления NO до NO_2 можно представить в виде следующих реакций [1]:



В спектре температур 1300–1500 °С значительно увеличивается скорость возникновения оксида азота в соответствии с реакцией [1]:



В нижних слоях атмосферы при нормальных условиях распространения шлейфа дымовых газов основной интерес представляет первая реакция.

Воздушные оксиды азота образуются в соответствии со следующими механизмами [1]:

1. Окисление атомарным кислородом молекулярного азота при больших температурах (механизм Зельдовича).

2. Разложение молекулярного азота под действием углеводородных радикалов с дальнейшим взаимодействием атомарного азота с гидроксильной группой OH (механизм Фенимора).

На процесс образования NO_x оказывают влияние различные параметры топочного процесса, содержание связанного азота в топливе и температура в зоне горения.

Концентрация оксидов азота линейно увеличивается с увеличением концентрации атомарного кислорода и экспоненциально с увеличением температуры [3].

Решающее влияние на образование «термических» NO оказывает максимальная температура и время реакции образования NO [3]:

$$NO_x^{терм} = f_1(T_{max}, \tau_p) = f_2\left(T_{max}, \frac{dT}{d\tau}\right), \quad (5)$$

где T_{max} – максимальная температура, °С; τ_p – время реакции образования NO , с.

Для снижения концентрации оксидов азота применяются методы, основанные на уменьшении концентрации окислителя и температуры в зоне факела, а кроме того, методы восстановления оксидов азота в топочной камере [4].

Для оптимизации работы существующих горелок требуется исследовать возможные режимы горения газа при варьировании технологических параметров [5]. В экспериментальных исследованиях варьирование параметров в широкой области их изменения весьма затруднительно. Поэтому для изучения режимов горения прибегают к математическому моделированию [5]. Известные в настоящее время теоретические работы по фильтрационному горению газов ограничены либо аналитическим обзором данных эксперимента, описанием физических явлений и формулировкой проблемы, либо отдельными частными расчетами на основе достаточно сложных моделей и алгоритмов, либо условиями, реализуемыми в лабораторном эксперименте [5].

Моделирование струйного течения является достаточно актуальным, особенно в части применения к газовым горелкам струйного типа [6].

Ниже предложена и исследована модель горения газа в цилиндрической горелке.

Постановка задачи. Для исследования влияния температуры подаваемого в качестве окислителя воздуха на уровень выделения оксидов азота был использован программный продукт САПР FlowVision. Многофункциональная система FlowVision позволяет моделировать трехмерное течение газа в технических объектах.

В результате расчета строились графики полей концентраций $NO_x^{терм}$ и температур в расчетной области.

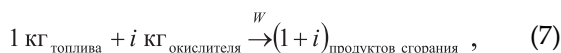
Модель «Горение» описывает процессы горения газовых смесей при дозвуковых числах Маха и основана на уравнениях Навье-Стокса и неразрывности [7]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где t – время, с.; x, y, z – координаты частицы; v_x, v_y, v_z – проекции скорости частицы; X, Y, Z –

проекции объемной силы; p – давление, Па; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Процесс горения представляется в виде брутто-реакции:



где W – скорость брутто-реакции.

Скорость брутто-реакции определяется скоростью турбулентного смешения топлива и окислителя. Для расчета скорости брутто-реакции W была использована турбулентная модель горения. Данная модель справедлива для предварительно несмешанных потоков топлива и окислителя. Для предварительно несмешанных потоков топлива и окислителя скорость W брутто-реакции определяется скоростью турбулентного смешения (модель Магнуссена) [7]:

$$W_{\max} = 23,6 \left(\frac{\mu \varepsilon}{\rho k^2} \right)^{1/4} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(f, \frac{o}{j} \right), \quad (8)$$

где f – концентрация топлива; o – концентрация окислителя; j – массовый стехиометрический коэффициент; μ – турбулентная вязкость, $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; k – пульсация; ε – масштаб турбулентности; W_{\max} – скорость горения несмешанного потока компонентов [6].

Расчетная область была задана в виде параллелепипеда $40 \times 200 \times 8$ мм, в центре левой грани которого была задана точка ввода струи газа. Струя газа подавалась со скоростью $v = 0,003374 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ через условное отверстие сечением 8×8 мм. Поток воздуха подавался со скоростью $v = 0,07445 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ через два симметричных сечения размерами 16×8 мм [8].

С помощью предложенного алгоритма можно определять температуру в зоне факела горения, обеспечивающую устойчивую работу и распределение концентраций оксида азота.

Решение задачи. В проведенном моделировании расчет производился для температур воздуха 20, 60, 100, 150 и 200 °С. Были получены распределения температуры и concentra-

ции оксида азота для пяти рассматриваемых вариантов.

Ниже приводятся результаты расчета интенсивности образования оксидов азота в зависимости от температуры окислителя, подаваемого к факелу горения. На рис. 1 показано распределение поля температур факела в продольном сечении расчетной области.

График зависимости образования оксидов азота при сжигании природного газа от температуры окислителя представлен на рис. 2.

Как видно из графика, образование термических оксидов азота при сжигании природного газа значительно зависит от температуры воздуха, подаваемого в горелку для образования газозвушной смеси. Максимальные значения объемной концентрации оксидов азота наблюдаются при температуре окислителя $t_b = 200$ °С.

График распределения температур факела в расчетной области по длине при сжигании природного газа от температуры окислителя представлен на рис. 3.

На основании графика можно сделать вывод, что температура подаваемого в зону горения окислителя оказывает незначительное влияние на распределение температур в зоне факела горения.

График зависимости концентраций оксидов азота по сечениям топочного пространства при различных температурах окислителя представлен на рис. 4.

Зависимость концентраций оксидов азота по сечениям топочного пространства при различных температурах окислителя описывается уравнением

$$r_{\text{NO}_2} = a e^{bt_b}, \quad (9)$$

где a , b – коэффициенты, зависящие от расположения сечения топочного пространства и температуры окислителя ($a = 239,25 \div 166,9$; $b = 0,2604 \div 0,2564$).

Сходимость данных моделирования с предложенными экспоненциальными зави-



Рис. 1. Поля распределения температур факела в продольном сечении расчетной области

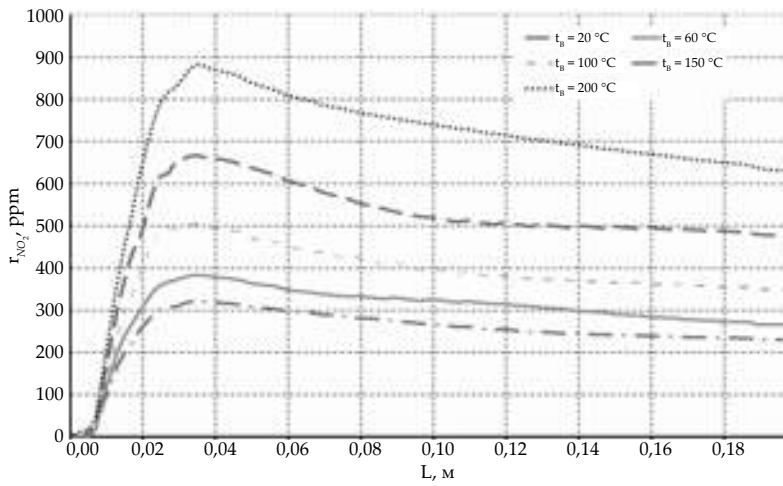


Рис. 2. График распределения концентраций оксида азота по длине при различных температурах окислителя

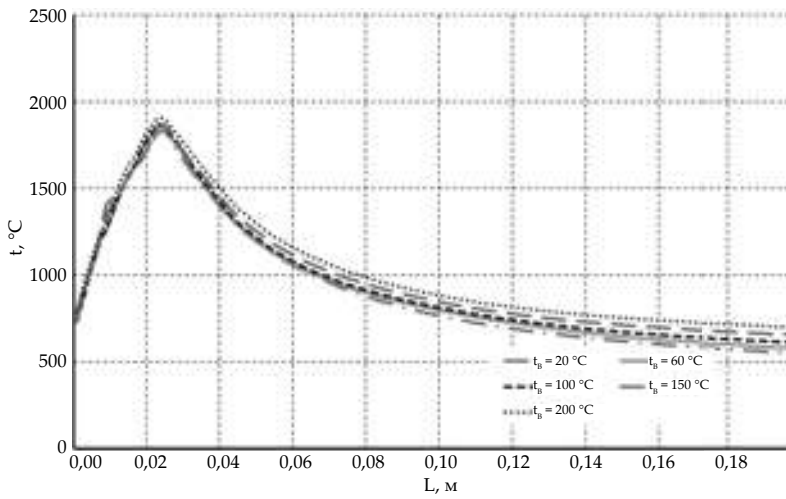


Рис. 3. График распределения температур факела в расчетной области по длине при различных температурах окислителя

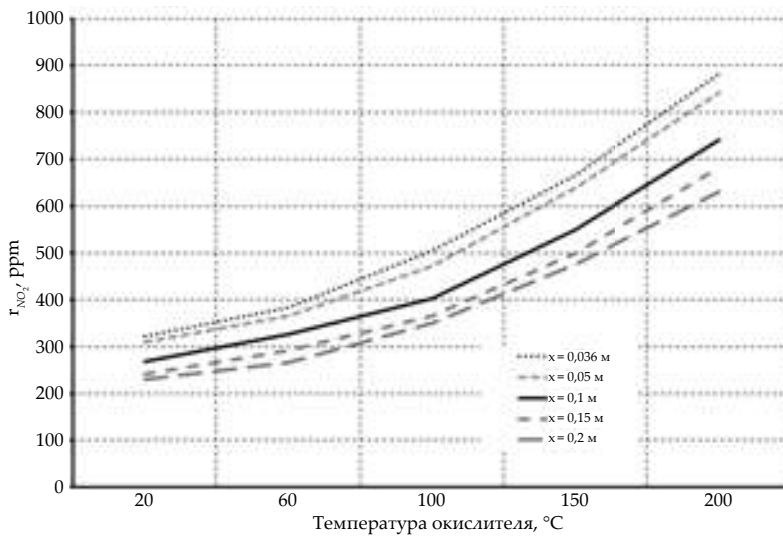


Рис. 4. График зависимости концентраций оксидов азота по сечениям топочного пространства при различных температурах окислителя

симостями характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9933$.

Влияние температуры в зоне горения факела на генерацию термических оксидов азота рассмотрено в исследованиях М.А. Таймарова, Д.Е. Чикляева и др. Исследование химических процессов образования оксидов азота при сжигании газа, проведенное данными авторами [9,10], подтвердило экспоненциальный характер повышения концентраций оксидов азота с увеличением температуры смеси. Полученные результаты соответствуют теоретически ожидаемым, и подобное моделирование может быть в дальнейшем использовано.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что температура потока окислителя существенно влияет на распределение концентрации оксида азота в дымовых газах: уменьшение температуры подаваемого в качестве окислителя воздуха приводит к падению концентрации оксидов азота в дымовых газах; наибольшее снижение концентрации наблюдается при температуре воздуха 20 °С, при этом температура в зоне факела снижается незначительно.

В данном исследовании рассмотрен только один из факторов, влияющих на уровень выделения оксидов азота в дымовых газах котельных установок, но методика численного расчета характеристик процесса горения природного газа позволяет проводить исследования широкого круга изменяющихся параметров.

Предложенная модель может быть использована для получения предварительных значений температур в зоне горения и концентраций оксидов азота в дымовых газах. Для оптимизации работы котельного агрегата, в том числе разработки эффективных мероприятий по снижению уровня оксидов азота, необходимо исследование целого ряда параметров, что предполагает выполнение дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 144 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». М.: Минприроды России; НИИ-Природа, 2018. 639 с.
3. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. М.: Недра, 1991. 294 с.
4. Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Сунгатуллин Р.Г., Лавирко Ю.В., Желтухина Е.С. Снижение вредных выбросов в атмосферу оксидов азота котлами ТЭС // Известия КазГАСУ. 2017. № 1 (39). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-vrednyh-vybrosov-v-atmosferu-oksidov-azota-kotlami-tes> (дата обращения: 09.07.2019).

5. Князева А.Г., Чумаков Ю.А. Двухтемпературная модель горения газа в модельном горелочном устройстве цилиндрической формы // Известия ТПУ. 2007. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvuhtemperaturnaya-model-goreniya-gaza-v-modelnom-gorelochnom-ustroystve-tsilindricheskoy-formy> (дата обращения: 13.04.2019).

6. Баландина О.А. Смешение струи углекислого газа со сносящим дозвуковым потоком воздуха // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8, № 2 (31). С. 142–145. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.24.

7. Синецын Н.Н., Сидоров И.В., Белодонова И.О., Шушкова К.А. Математическая модель расчёта теплообмена в топке котла. // Вестник ЧГУ. 2013. Т. 3, № 4. С. 24–29.

8. FlowVision Версия 2.5.4. Примеры решения типовых задач: сайт FlowVision. [Электронный ресурс]. URL: <http://flowvision.ru/index.php/public-downloads/category/8-dokumentatsiya-flowvision> (дата обращения: 01.04.2019).

9. Таймаров М.А., Чикляев Д.Е. Образование термических оксидов азота при сжигании газа // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16, № 23. С. 73–75.

10. Исследование химических процессов образования оксидов азота при сжигании газа и мазута / М.А. Таймаров, Н.Е. Кувшинов, Р.В. Ахметова, Р.Г. Сунгатуллин, Д.Е. Чикляев // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2016. Т. 19, № 20. С. 80–83.

REFERENCES

1. Kotler V.R. *Oksidy azota v dymovykh gazakh kotlov* [Nitrogen oxides in boiler flue gases]. Energoatomizdat Publ., 1987. 144 p.
2. State report. On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2017. Moscow, Minprirody Rossii, NIA Priroda., 2018. 639 p. (in Russian)
3. Sigal I.Ya. *Zashchita vozdushnogo basseyna pri szhiganii topliva* [Protection of the air basin during fuel combustion]. Nedra Publ., 1991. 294 p.
4. Taymarov M.A., Ahmetova R.V., Sungatullin R.G., Lavirko YU.V., Zheltuhina E.S. Reduction of harmful emissions into the atmosphere of nitrogen oxides by boilers of thermal power plants. *Izvestiya KazGASU* [News of the KSUAE], 2007, no. 1 (39). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-vrednyh-vybrosov-v-atmosferu-oksidov-azota-kotlami-tes> (accessed 9 July 2019). (in Russian)
5. Knyazeva A.G., Chumakov Yu.A. Two-temperature model of gas combustion in a model cylindrical burner device. *Izvestiya TPU* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2007, no. 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvuhtemperaturnaya-model-goreniya-gaza-v-modelnom-gorelochnom-ustroystve-tsilindricheskoy-formy/> (accessed 13 April 2019).
6. Balandina O.A. Mixing of carbon dioxide jet with subsonic air flow. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2018, vol. 8,

no. 2 (31), pp. 142–145. (In Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.24

7. Sinitsyn N.N., Sidorov I.V., Belodonova I.O., Shushkova K.A. Mathematical model of calculation of heat and mass transfer in the boiler furnace. *Vestnik ChGU* [Proc. of the Cherepovets State University], 2013, vol. 3, no. 4, pp. 24–29. (in Russian)

8. FlowVision Version 2.5.4. Examples of typical tasks: the site Studied. Available at: <http://flowvision.ru/index.php/public-downloads/category/8-dokumentatsiya-flowvision/> (accessed 1 April 2019).

9. Taymarov M.A., Chiklyayev D.E. Formation of thermal nitrogen oxides during gas combustion. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Proc. of the Kazan technological University], 2013, vol. 16, no. 23, pp. 73–75. (in Russian)

10. Taymarov M.A., Kuvshinov N.E., Akhmetova R.V., Sungatullin R.G., Chiklyayev D.E. Investigation of chemical processes of formation of nitrogen oxides during combustion of gas and fuel oil. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Proc. of the Kazan technological University], 2016, vol. 19, no. 20, pp. 80–83. (in Russian)

Об авторах:

БАЛАНДИНА Ольга Александровна

ассистент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции

Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: balandinaolya88@rambler.ru

BALANDINA Olga A.

Assistant of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair

Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: balandinaolya88@rambler.ru

ПУРИНГ Светлана Михайловна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции

Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: puring@mail.ru

PURING Svetlana M.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair

Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194

Для цитирования: Баландина О.А., Пуринг С.М. Исследование влияния температуры воздуха на уровень выделения оксидов азота в дымовых газах котельных установок // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9, № 4. С. 27–32. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.5.

For citation: Balandina O.A., Puring S.M. Research of Influence of Air Temperature on the level of nitrogen oxides in smoke gases of boiler plants. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2019. Vol. 9, no. 4. Pp. 27–32. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.5.