

## Определение зависимости концентрации мелкодисперсной пыли PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в атмосфере селитебных территорий

*В.Н. Азаров, О.О. Иванова, А.А. Добринская, Т.В. Соловьева,*

*А.Б. Стреляева, Е.Е. Евдокимов, М.Ю. Белогородская*

*Волгоградский государственный технический университет*

**Аннотация:** В рамках городской среды получены законы распределения концентрации мелкодисперсной пыли PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> вдоль дорожных участков. Эти данные необходимы для оценки вероятности превышения предельно допустимых концентраций и улучшения систем мониторинга и контроля состояния атмосферного воздуха. Проведен анализ ключевых факторов, влияющих на содержание частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в воздухе прилегающих к дорогам территорий. Были получены уравнения регрессии для общей пыли, пыли PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>, позволяющие сделать вывод о зависимости концентрации PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> от общей пыли. Проведенный анализ показал, что массовое содержание PM<sub>10</sub> в общем пылевом загрязнении колеблется в диапазоне 73 – 81%, а концентрация мелкодисперсной пыли PM<sub>2,5</sub> колеблется в пределах двух узких диапазонов около 11,6 и около 7 мкм. Исследование доли PM<sub>2,5</sub> от общей концентрации показало, что она составляет в среднем порядка 20%.

**Ключевые слова:** пыль, выбросы, концентрация, атмосферный воздух, проезжая часть, климат, линейный город, коэффициент корреляции, влияющие факторы.

Изучение направлений и скоростей воздушных потоков играет решающую роль в создании эффективных систем мониторинга загрязнений, возникающих от подвижных источников, которые не являются стационарными. Это позволяет лучше понимать их воздействие на окружающую среду и разрабатывать соответствующие меры для контроля и минимизации вредных выбросов [1-3]. Эти данные также необходимы для оценки уровня загрязнения, которому подвергаются фасады зданий и сооружений.

Воздействие автомобильного транспорта на городскую среду включает в себя такие аспекты, как токсичность выбросов, эффективность систем мониторинга, влияние транспортных потоков на уровень шума и распространение мелкодисперсной пыли (PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>). Эти вопросы были предметом изучения множества исследователей [4-6]. Тем не менее, исследования, посвященные характеристикам линейного города, каковым является Волгоград, до сих пор не проводились.



Рис. 1. - Карта-схема точек мониторинга

Целью настоящего исследования является определение главных факторов, влияющих на уровень концентрации мелкодисперсных частиц пыли в воздухе вдоль автомобильных дорог (рисунок 1). Кроме того, преследуется задача разработки регрессионного уравнения, позволяющего установить взаимосвязи между концентрациями мелкодисперсной пыли PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>, а также основными факторами, оказывающими влияние на их распределение [7-9].

Выявлено, что для оперативного прогнозирования концентрации мелкодисперсной пыли в воздухе на придорожных территориях было разработано регрессионное уравнение [10], которое позволяет установить связь между концентрациями PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> на обочине автодорог и

основными влияющими факторами, такими как скорость и интенсивность движения, длина участка дороги и климатические условия.

В рамках проведенных исследований [10] также продемонстрировано, что для оценки концентрации мелкодисперсной пыли вблизи городских магистралей существует корреляция между уровнями  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$  и ключевыми факторами, оказывающими влияние (рисунки 2 и 3).

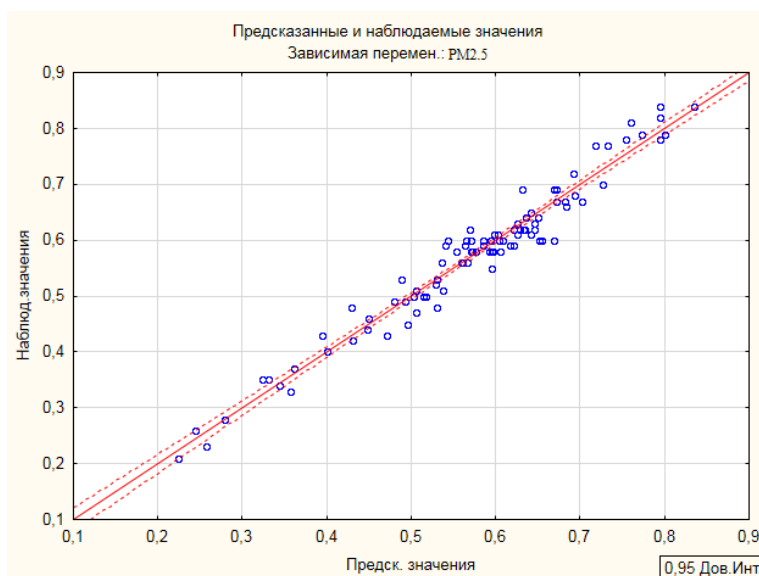


Рис. 2. - Распределение значений  $PM_{2,5}$

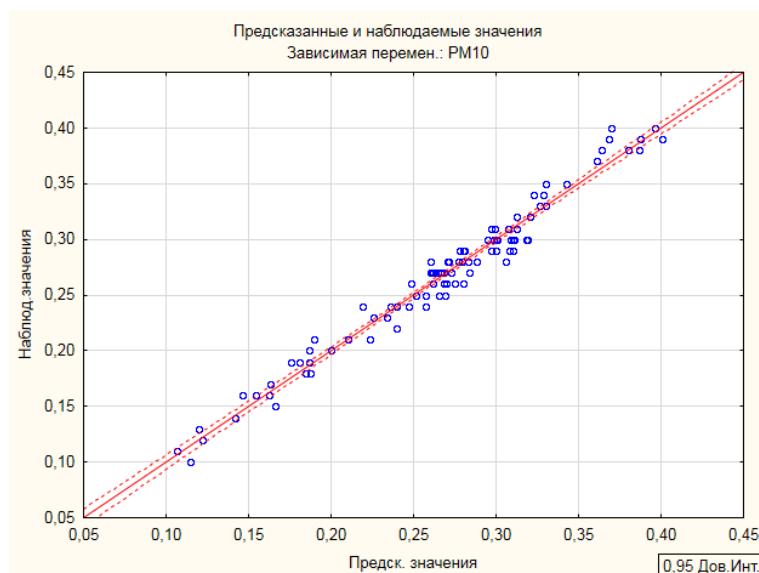


Рис.3. - Распределение значений  $PM_{10}$

В результате проведенных экспериментов и анализа полученных данных было установлено, что основными факторами, влияющими на

концентрацию частиц PM<sub>2,5</sub> вдоль дорожного полотна, являются скорость ветра, интенсивность грузоперевозок, температура воздуха, уровень влажности, длина участка дороги и уклон. Что касается мелкодисперсной пыли PM<sub>10</sub>, её концентрация определяется температурой в сочетании с влажностью воздуха, а также скоростью ветра в сочетании с продольным уклоном дороги и интенсивностью движения грузовых автомобилей.

Исследования продемонстрировали, что скорость и интенсивность транспортных потоков оказывают заметное воздействие на уровень пылевого загрязнения, особенно на участках дорог с интенсивным движением в часы пик. При повышении скорости движения возрастает турбулентность воздушных потоков, что способствует как рассеиванию частиц пыли на более обширные территории, так и увеличению их концентрации в непосредственной близости к проезжей части. Кроме того, интенсивность движения грузового транспорта также значительно увеличивает уровень пылевого загрязнения, поскольку тяжелые автомобили производят большее количество частиц в результате абразивного износа дорожного покрытия и выбросов из выхлопных систем.

Климатические условия имеют важное значение для формирования уровней загрязнения воздуха. Например, повышенная влажность способствует оседанию пылевых частиц, что временно снижает их концентрацию в атмосфере. В то же время, в условиях сухой и жаркой погоды наблюдается увеличение уровней пыли. Влияние температуры также было подмечено в ряде исследований [3]. В летние месяцы высокие температуры могут усиливать испарение влаги с поверхности дорог, что приводит к увеличению концентрации пыли в воздухе.

Длинные и прямые отрезки дороги способствуют равномерному распределению пыли. В то же время, на участках с уклоном может происходить накопление пылевых частиц в нижней части дороги. Уклон

---

также оказывает влияние на скорость движения транспортных средств, что, в свою очередь, влияет на процессы воздушной турбулентности. Это может приводить как к увеличению, так и к снижению концентраций загрязняющих веществ, в зависимости от конкретной ситуации.

Были также получены уравнения регрессии для общей пыли, пыли PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>.

Имеются три выборки объемом 95 измерений каждая: общая пыль — С (мкг/м<sup>3</sup>); пыль — PM<sub>2,5</sub> (мкг/м<sup>3</sup>) и пыль — PM<sub>10</sub> (мкг/м<sup>3</sup>). Диапазоны изменения частиц пыли указаны в таблице 1.

Таблица 1 - Диапазон изменения частиц пыли

Обозначение пыли	Минимальное значение, мкг/м <sup>3</sup>	Максимальное значение, мкг/м <sup>3</sup>
С	76,1	186,2
PM <sub>2,5</sub>	10,6	19,52
PM <sub>10</sub>	53,6	149,2

При исследовании зависимости PM<sub>10</sub> от С было получено линейное уравнение регрессии, результаты указаны в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты линейной регрессии зависимости PM<sub>10</sub> от С

N=95	Коэффициенты уравнения регрессии для зависимости PM <sub>10</sub> R= 0,92238130					
	БЕТА	Ст.Ош. БЕТА	В	Ст.Ош. В	t(85)	p-знач.
Св.член			-10,1337	0,363632	2,36471	0,020322
Р	0,902381	0,044686	0,8636	0,042764	20,19372	0,000344

По результатам натурных изменений при  $76,1 \leq C \leq 186,2$  мкг/м<sup>3</sup> уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$PM_{10} = -10,1337 + 0,86 \cdot C, \quad (1)$$

На рисунке 4 изображена доверительная область линии регрессии для PM<sub>10</sub> для придорожных территорий (рисунок 4).

Анализ результатов измерений показывает, что доля PM10 в общей концентрации изменяется от 73% до 81%.

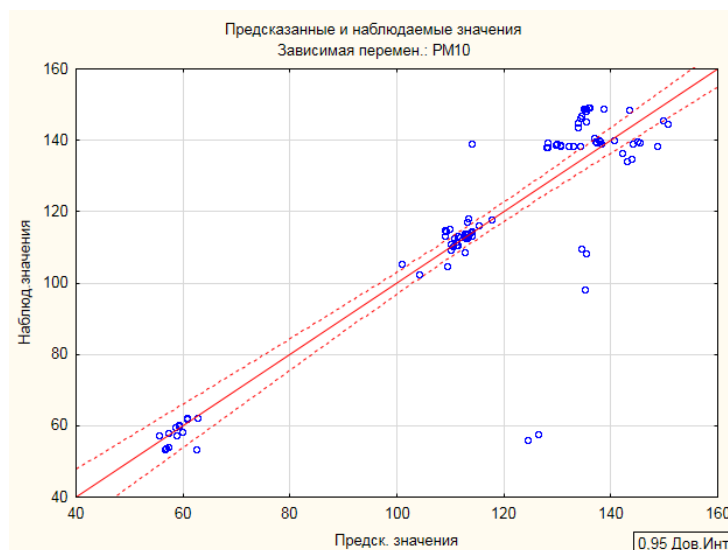


Рис. 4. - Доверительная область линии регрессии для PM10 для придорожных территорий

При исследовании зависимости PM2,5 от общей концентрации пыли С была получена кусочно – линейная регрессия с точкой разрыва, так как вид зависимости между результативной переменной и факторной переменной оказался неодинаков в различных областях значений факторной переменной. Результаты кусочно-линейной регрессии приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты кусочно-линейной регрессии

N=95	Кусочно-линейная регрессия с точкой разрыва для зависимой переменной: PM2,5 R= 0,89348				
	В0	Р	В0	Р	Т. разр.
Оценка	11,69185	-0,000712	3,480609	0,056489	145,2

Имеем уравнение кусочно-линейной регрессии:

$$PM_{2,5} = \begin{cases} 11,692 - 0,0007 \cdot C, & \text{если } 76,1 \leq C \leq 145,2 \\ 3,480 + 0,056 \cdot C, & \text{если } 145,2 < C \leq 186,2. \end{cases} \quad (2)$$

Анализ показывает, что на всех участках обследования можно выделить лишь 2 варианта концентрации мелкодисперсной пыли в очень узких диапазонах: приблизительно 11,69 и 7,0 мкг/м<sup>3</sup>.

Одной из важных характеристик мелкодисперсной пыли является доля, которую составляет величина PM<sub>2,5</sub> от общей концентрации  $\overline{PM_{2,5}}$  равная  $\overline{PM_{2,5}} = PM_{2,5}/C$ .

При рассмотрении зависимости этой величины  $\overline{PM_{2,5}}$  от C было получено уравнение линейной регрессии. Результаты указаны в таблице 4.

Таблица 4. Результаты линейной регрессии величины  $\overline{PM_{2,5}}$

N=95	Итоги регрессии для зависимой переменной: PM <sub>2,5</sub> /C R= 0,90626307					
	БЕТА	Ст.Ош. БЕТА	В	Ст.Ош. В	t(85)	p-знач.
Св.член			0,199115	0,006928	28,7415	0,00002
P	-0,854263	0,053905	-0,000739	0,000047	-15,8476	0,00001

Уравнение линейной регрессии:

$$PM_{2,5}/C = 0,199 - 0,0007 \cdot C \quad (3)$$

На рисунке 5 изображена доверительная область линии регрессии для PM<sub>2,5</sub>/C.

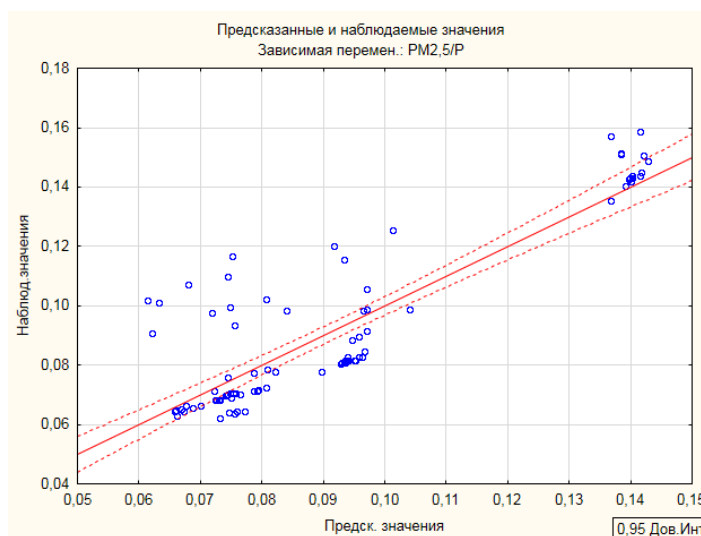


Рис. 5. - Доверительная область линии регрессии для PM<sub>2,5</sub>/C



При исследовании зависимости  $PM_{2,5}$  от  $PM_{10}$  была получена кусочно-линейная регрессия. Результаты кусочно-линейной регрессии приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты кусочно-линейной регрессии

N=95	Кусочно-линейная регрессии с точкой разрыва для зависимой переменной: $PM_{2,5}$ $R = 0,88348$				
	B0	P	B0	P	T. разр.
Оценка	11,76240	-0,001506	9,87312	0,014866	115,16

Уравнение кусочно-линейной регрессии:

$$PM_{2,5} = \begin{cases} 11,762 - 0,0015 \cdot PM_{10}, & \text{если } 53,6 \leq PM_{10} \leq 115,16 \\ 13,936 + 0,0149 \cdot PM_{10}, & \text{если } 115,16 < PM_{10} \leq 149,2. \end{cases} \quad (4)$$

На рисунке 6 изображена диаграмма рассеивания для  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$ .

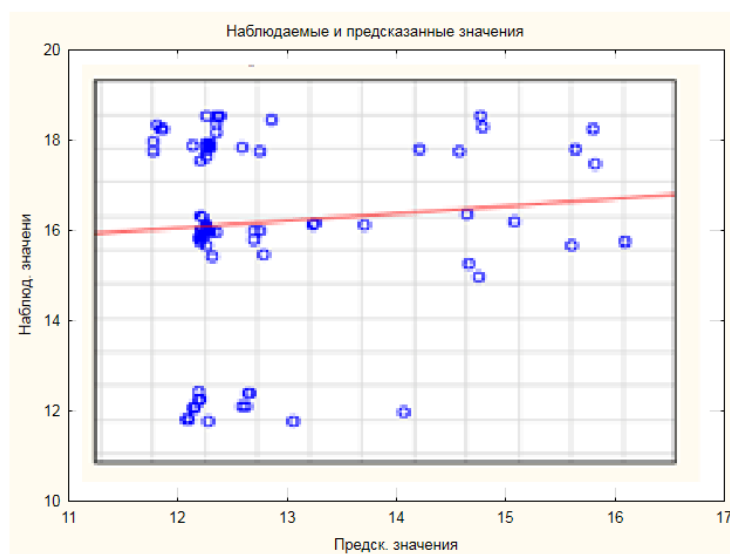


Рис. 6. - Диаграмма рассеивания для  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$

Для различных зон линейного города были определены законы распределения концентраций  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  в атмосферном воздухе вблизи дорожных участков. Эти данные имеют ключевое значение для оценки вероятности превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) и повышения эффективности мониторинга качества атмосферного воздуха. Также были сформулированы уравнения регрессии для общей пыли,  $PM_{2,5}$  и



PM<sub>10</sub>, что позволяет установить взаимосвязь концентраций PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> с общей концентрацией пыли. Массовая доля PM<sub>10</sub> в общем пылевом загрязнении колеблется от 73% до 81%, в то время как концентрация мелкодисперсной пыли PM<sub>2,5</sub> находится в узких диапазонах около 11,6 и 7 мкм. Эти результаты подтверждают существующую связь между концентрацией частиц и экологическими условиями. Исследование доли PM<sub>2,5</sub> от общей концентрации показало, что она в среднем составляет около 20%, при этом зависимость PM<sub>2,5</sub> от PM<sub>10</sub> также оказалась незначительной.

Полученные уравнения регрессии позволяют не только прогнозировать концентрации мелкодисперсной пыли в атмосфере на придорожных территориях, но и дают возможность оптимизировать системы мониторинга качества воздуха.

Таким образом, для точного прогнозирования уровней пыли вдоль городских магистралей необходимо принимать во внимание такие факторы, как скорость ветра, интенсивность транспортных грузоперевозок, температуру и влажность воздуха, а также длину и наклон дорожного покрытия. Эффективное использование собранной информации в городском планировании и управлении транспортными потоками может существенно снизить негативное воздействие загрязнения воздуха на здоровье населения, что, в свою очередь, положительно скажется на качестве жизни в городских зонах.

### Литература

1. Антюфеев А. В., Птичникова Г. А. Линейный город. Градостроительная система Большой Волгоград, Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2018. - 197 с.
2. Барикаева Н. С. Совершенствование системы мониторинга загрязнения воздуха придорожных территорий городов мелкодисперсной пылью: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.19 – Волгоград, 2017. – 159 с.

3. Ketzler M., Jensen S., Brandt J., Ellermann T., Olesen H.R. Evaluation of the street pollution model OSPM for measurements at 12 streets stations using a newly developed and freely available evaluation tool. J. Civil. Environ. Eng. S1:004.doi:10.4172/2165-784X, 2012.

4. Лопатина Т. Н. Исследование загрязнения мелкодисперсной пылью PM10 и PM2,5 воздушной среды городов курортов (на примере г. Ессентуки) : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.19 – Волгоград, 2016. – 130 с.

5. Иванова Ю. П., Соловьева Т. В., Сахарова А. А., Иванова О. О., Лепехина Д. М., Сидельникова О. П. Основные факторы, влияющие на концентрацию мелкодисперсной пыли на придорожных территориях линейного города. Инженерный вестник Дона, 2022, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7874.

6. Startseva, Yu.V.; Chernushenko, A.A.; Yevtushenko, A.I.; Yevtushenko, I.I. Dust pollution of the air during the reloading of construction waste into a container. International Scientific Conference Ecological and Biological Well-Being of Flora and Fauna (Part 1), 2023. DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202342007003.

7. Боровиков, А. В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере / Санкт-Петербург: Изд. дом «Питер», 2001 – 656 с.

8. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. - 543 с.

9. Голдаев С. В., Радюк К. Н. Проверка с помощью критерия Пирсона статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности по закону Вейбулла–Гнеденко. Материалы двадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 127–130.

10. Сидельникова О. П., Иванова Ю. П., Иванова О. О., Сахарова А. А., Лясин Р. А., Азарова М. Д. Зависимость концентрации мелкодисперсной

---



пыли на бордюре проезжей части от воздействия внешних факторов, Инженерный вестник Дона, 2022, № 9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/%20n9y2022/7882](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/%20n9y2022/7882).

### References

1. Antyufeev A. V., Ptichnikova G. A. Linejnyj gorod. Gradostroitel'naya sistema Bol'shoj Volgograd, Volgograd [Linear city. The urban planning system of Greater Volgograd]: Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2018. 197 p.

2. Barikaeva N. S. Sovershenstvovanie sistemy monitoringa zagryazneniya vozduha pridorozhnyh territorij gorodov melkodispersnoj pyl'yu [Improving the system for monitoring air pollution of roadside areas of cities with fine dust]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.19. Volgograd, 2017. 159 p.

3. Ketzl M., Jensen S., Brandt J., Ellermann T., Olesen H.R. J. Civil. Environ. Eng. S1:004.doi:10.4172/2165-784X, 2012.

4. Lopatina T. N. Issledovanie zagryazneniya melkodispersnoj pyl'yu RM10 i RM2, 5 vozdushnoj sredy gorodov kurortov (na primere g. Essentuki) [Investigation of fine dust pollution PM10 and PM2.5 of the air environment of resort towns (using the example of Yessentuki)] : dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.19. Volgograd, 2016. 130 p.

5. Ivanova YU. P., Solov'eva T. V., Sakharova A. A., Ivanova O. O., Lepekhina D. M., Sidel'nikova O. P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7874](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7874).

6. Startseva, Yu.V.; Chernushenko, A.A.; Yevtushenko, A.I.; Yevtushenko, I.I. Dust pollution of the air during the reloading of construction waste into a container. International Scientific Conference Ecological and Biological Well-Being of Flora and Fauna (Part 1), 2023. DOI: [doi.org/10.1051/e3sconf/202342007003](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342007003).



7. Borovikov, A. V. Statistica. Iskusstvo analiza dannyh na komp'yutere. [Statistica. The art of analyzing data on a computer]. Sankt-Peterburg: Izd. dom «Piter», 2001. 656 p.

8. Kremer N. SH. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. Moskva: YUNITI-DANA, 2002. 543 p.

9. Goldaev S. V., Radyuk K. N. Materialy dvadcatoj Vserossijskoj nauchno–tekhnicheskoy konferencii «Energetika: ekologiya, nadezhnost', bezopasnost'». Tomsk: Izd–vo TPU, 2014. Pp. 127–130.

10. Sidel'nikova O. P., Ivanova YU. P., Ivanova O. O., Sakharova A. A., Lyasin R. A., Azarova M. D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/%20n9y2022/7882](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/%20n9y2022/7882).

**Дата поступления: 2.09.2024**

**Дата публикации: 14.10.2024**