

Исследование вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей внутри помещений зданий в течение суток от автотранспортных магистралей

Н.А. Литвинова², В.Н. Азаров¹

¹*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

²*Тюменский индустриальный университет, Тюмень*

Аннотация: Данная статья посвящена исследованию концентраций оксида углерода (II), фенола, формальдегида, углеводородов алифатических в помещениях зданий, в том числе оценке закономерностей их вертикального распределения по высоте зданий в разное время суток от автотранспорта. Исследования нужны с целью разработки программы для электронно-вычислительных машин, которая необходима при проектировании объектов строительства.

Ключевые слова: помещения, оксид углерода (II), фенол, формальдегид, углеводороды алифатические, здания, время суток.

На сегодняшний день воздушная среда зданий крупных городов сильно загрязнена вредными газообразными веществами от автотранспорта [1 – 3]. Кроме того, во многих крупных мегаполисах сложилась устойчивая тенденция роста передвижных источников [4 – 6]. Такие источники особенно неблагоприятны для качества внутреннего воздуха помещений многоэтажных зданий [7 – 9].

Исследования вертикального распределения концентраций твердых дисперсных пылевых частиц в атмосферном воздухе проведены многими учёными [8 – 10]. Но в настоящее время отсутствуют расчеты эффекта суммации газообразных загрязняющих веществ от передвижных источников (автотранспорта) с учетом внутреннего типа локальной застройки, перемещения масс и времени суток. Требуется принимать проектные решения по выбору площадок под строительство зданий с учетом структуры градостроительных типологий застройки.

Цель работы – исследование величины концентраций газообразных загрязнителей в помещениях по высоте многоэтажных зданий в течение

суток от автотранспорта при различных метеорологических факторах атмосферного воздуха и типах локальной застройки района.

Задачи работы: 1) Провести экспериментальные исследования качества воздуха снаружи и внутри помещений при различных типах локальной застройки от автомагистралей; 2) Исследовать влияние температуры, влажности, скорости атмосферного воздуха на качество воздуха внутри помещения от автотранспорта в течение суток; 3) На основании полученных многофакторных регрессионных зависимостей разработать программное обеспечение по расчету концентраций загрязнителей внутри помещений многоэтажных зданий по времени суток от автотранспортных магистралей разной интенсивности.

Приборы и методы исследования

Многолетние экспериментальные исследования закономерностей вертикального распределения концентраций по высоте зданий при различных типах локальной застройки проведены с 2006 по 2020 гг. Отбор проб от передвижных источников проводился с 6 до 13 ч или с 14 до 21 ч. Экспериментально фиксировалась скорость ветра (м/с) и отмечалось ее направление. Точки исследования, выбранные для отбора проб – здания, находящиеся на расстоянии 30; 50; 100 м от магистралей с различной интенсивностью движения: до 500 авт./час; от 500-1000 авт./час; от 1000 – 2000 авт./час; от 2000-3000 авт./час. Замеры проведены вблизи зданий, точки взяты на расстоянии не менее 0,5 м от их наружной стены. Отбор проводился со стороны магистрали, с наветренной и подветренной стороны от магистрали. Для исследования выбраны неблагоприятные метеорологические условия при отборе проб: направление ветра 90° от магистралей к зданию, ветер на здание.

Замеры в атмосферном воздухе по наружной стене зданий проводились с помощью сертифицированного оборудования (газоанализаторы ГАНК, testo

341) на каждом этаже здания. Измерялись концентрации газообразных загрязнителей в атмосферном воздухе от автотранспорта: оксид углерода (II), фенола, формальдегида, углеводородов алифатических (C1-C5). Выбирались здания при различном типе локальной застройки (строчная, периметральная, торцевая, смешанная) с учетом аэродинамических теней от зданий (рисунок 1). Выбор данных загрязнителей для исследования обоснован тем, что по результатам многих исследований концентрации таких газообразных веществ в атмосферном воздухе сохраняются при высокой влажности и увеличиваются при температурных инверсиях [2, 7].

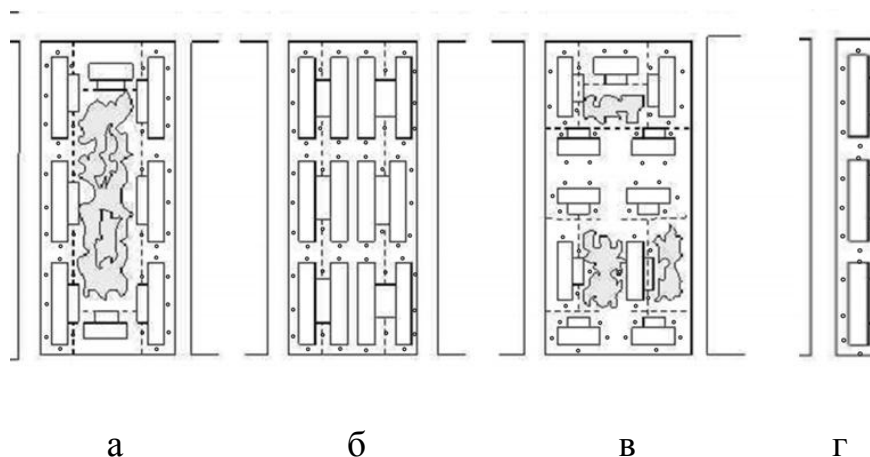


Рис. 1. –Точки отбора проб при различных типах локальной застройки:

а – периметральная; б – строчная; в – смешанная; г – торцевая

Одновременно измерялась концентрация загрязнителей внутри помещений на каждом этаже здания, при двух режимах: при плотно закрытых оконных конструкциях и при режиме проветривания (окно полностью открыто). Все замеры проведены с учетом рассчитанных зон подветренной тени, зон наветренной тени или зон подпора.

Результаты и их обсуждение

Сравнение измеренной концентрации с ПДК для СО показало ее фактическое превышение в воздушной среде в помещениях зданий на первом

этаже (1,3–1,6ПДК_{сс}). Проведены экспериментальные исследования концентраций оксида углерода (II), фенола, формальдегида, углеводородов алифатических (C1-C5) по высоте зданий (по этажам) внутри помещений многоэтажных зданий (высотой 30 метров) от автомагистралей разной интенсивности движения в режиме проветривания при наиболее неблагоприятной скорости ветра 2-3 м/с и направлении ветра 90° при различных типах локальной застройки. Экспериментальные данные для примера представлены в таблицах 1-4 в разное время суток для периметральной застройки, интенсивность магистрали свыше 2000 авт./час.

Таблица № 1

Экспериментальные данные среднегодовых концентраций
(С, мг/м³) оксид углерода (II) по высоте с наветренной стороны зданий

Высота от поверхности земли h, м	С, мг/м ³	Концентрация загрязнителя в разное время суток, мг/м ³							
		от 6 до 8 ч	8 до 10 ч	10 до 13 ч	13 до 15 ч	15 до 17 ч	17 до 20 ч	20 до 00 ч	от 00 до 6 ч
1,50	9,40	4,70	16,93	6,58	13,17	8,46	23,51	6,58	2,91
4,50	9,23	4,62	16,62	6,46	12,93	8,31	23,08	6,46	2,85
7,50	9,06	4,53	16,31	6,34	12,69	8,16	22,65	6,34	2,80
10,50	8,89	4,45	16,00	6,22	12,45	8,00	22,23	6,22	2,75
13,50	8,72	4,36	15,70	6,10	12,21	7,85	21,80	6,10	2,69
16,50	8,55	4,27	15,39	5,98	11,97	7,69	21,37	5,98	2,64
19,50	8,38	4,19	15,08	5,86	11,73	7,54	20,95	5,86	2,59
22,50	8,21	4,10	14,77	5,75	11,49	7,39	20,52	5,75	2,54
25,50	8,04	4,02	14,47	5,63	11,25	7,23	20,09	5,63	2,48
28,50	7,87	3,93	14,16	5,51	11,01	7,08	19,66	5,51	2,43

Таблица № 2

Экспериментальные данные среднегодовых концентраций (C , мг/м^3) фенола

Высота от поверхности земли h , м	C , мг/м^3	Концентрация загрязнителя в разное время суток, мг/м^3							
		от 6 до 8 ч	8 до 10 ч	10 до 13 ч	13 до 15 ч	15 до 17 ч	17 до 20 ч	20 до 00 ч	от 00 до 6 ч
1,50	0,021	0,011	0,039	0,015	0,030	0,019	0,054	0,011	0,039
4,50	0,021	0,011	0,038	0,015	0,030	0,019	0,053	0,011	0,038
7,50	0,021	0,010	0,037	0,015	0,029	0,019	0,052	0,010	0,037
10,50	0,020	0,010	0,037	0,014	0,028	0,018	0,051	0,010	0,037
13,50	0,020	0,010	0,036	0,014	0,028	0,018	0,050	0,010	0,036
16,50	0,020	0,010	0,035	0,014	0,027	0,018	0,049	0,010	0,035
19,50	0,019	0,010	0,034	0,013	0,027	0,017	0,048	0,010	0,034
22,50	0,019	0,009	0,034	0,013	0,026	0,017	0,047	0,009	0,034
25,50	0,018	0,009	0,033	0,013	0,026	0,017	0,046	0,009	0,033
28,50	0,018	0,009	0,032	0,013	0,025	0,016	0,045	0,009	0,032

Аналогичные экспериментальные данные среднегодовых концентраций получены для всех типов застройки: периметральная, торцевая, торцевая под углом, строчная, смешанная, при различной интенсивности движения автотранспорта, так как отбор проб осуществлялся одновременно как в атмосферном воздухе, так и внутри помещения. Наибольший пик концентраций загрязнителей (превышения в 2-3 раза от ПДК_{сс}) внутри и снаружи зданий отмечен при периметральной застройки как снаружи, так и внутри помещения (в режиме проветривания) с 8 до 10 часов для оксид углерода (II) увеличивается на 43-45%, с 17 до 20 часов – на 40-41%; для фенола самые высокие концентрации отмечены на 17-20 часов –

увеличивается на 47%, для формальдегида – с 8 до 10 часов и с 17 до 20 часов на 60-61%, для углеводородов алифатических – на 61% по сравнению с ночью с 00 до 6 часов и днём с 13 до 15 часов (таблицы 1-4). В режиме проветривания в воздушной среде внутри здания концентрация загрязнителей достигает до 80-88,5% от концентрации по наружной стене здания, при закрытых проемах от 21,2 до 46,2%.

Таблица № 3

Экспериментальные данные среднегодовых концентраций (C , $\text{мг}/\text{м}^3$) формальдегида по высоте с наветренной стороны зданий

Высота от поверхности земли h , м	C , $\text{мг}/\text{м}^3$	Концентрация загрязнителя в разное время суток, $\text{мг}/\text{м}^3$							
		от 6 до 8 ч	8 до 10 ч	10 до 13 ч	13 до 15 ч	15 до 17 ч	17 до 20 ч	20 до 00 ч	от 00 до 6 ч
1,50	0,032	0,016	0,058	0,023	0,045	0,029	0,081	0,016	0,058
4,50	0,032	0,016	0,057	0,022	0,045	0,029	0,080	0,016	0,057
7,50	0,031	0,016	0,056	0,022	0,044	0,028	0,078	0,016	0,056
10,50	0,031	0,015	0,055	0,021	0,043	0,028	0,077	0,015	0,055
13,50	0,030	0,015	0,054	0,021	0,042	0,027	0,075	0,015	0,054
16,50	0,030	0,015	0,053	0,021	0,041	0,027	0,074	0,015	0,053
19,50	0,029	0,014	0,052	0,020	0,041	0,026	0,072	0,014	0,052
22,50	0,028	0,014	0,051	0,020	0,040	0,026	0,071	0,014	0,051
25,50	0,028	0,014	0,050	0,019	0,039	0,025	0,069	0,014	0,050
28,50	0,027	0,014	0,049	0,019	0,038	0,024	0,068	0,014	0,049

Таблица № 4

Экспериментальные данные среднегодовых концентраций (C , мг/м^3) углеводородов алифатических по высоте с наветренной стороны зданий

Высота от поверхности земли h , м	C , мг/м^3	Концентрация загрязнителя в разное время суток, мг/м^3							
		от 6 до 8 ч	8 до 10 ч	10 до 13 ч	13 до 15 ч	15 до 17 ч	17 до 20 ч	20 до 00 ч	от 00 до 6 ч
1,50	1,207	0,604	2,174	0,845	1,691	1,087	3,019	0,845	0,604
4,50	1,186	0,593	2,134	0,830	1,660	1,067	2,965	0,830	0,593
7,50	1,164	0,582	2,095	0,815	1,629	1,047	2,910	0,815	0,582
10,50	1,142	0,571	2,056	0,799	1,599	1,028	2,856	0,799	0,571
13,50	1,120	0,560	2,017	0,784	1,568	1,008	2,801	0,784	0,560
16,50	1,098	0,549	1,977	0,769	1,538	0,988	2,746	0,769	0,549
19,50	1,076	0,538	1,938	0,753	1,507	0,969	2,692	0,753	0,538
22,50	1,055	0,527	1,899	0,738	1,477	0,949	2,637	0,738	0,527
25,50	1,033	0,516	1,859	0,723	1,446	0,929	2,583	0,723	0,516
28,50	1,011	0,505	1,820	0,708	1,416	0,910	2,528	0,708	0,505

Расчет концентраций загрязнителей внутри помещений $C_{\text{вн}}$ производится по нижеприведенным формулам (1) -(4), полученным на основе экспериментальных данных с наветренной и подветренной сторон зданий:

- оксида углерода (II):

$$C_{\text{вн}} = 0,89 \cdot K_T \cdot \left(0,6708 - 0,00545 \frac{Ri}{R_{\text{max}}} + 0,00021 \cdot I - 0,196 \frac{hi}{H} \right) \cdot [2,136 + 0,02799 \cdot T - 0,2819 \cdot V - 0,000003 \cdot \varphi], \quad (1)$$

- фенола:

$$C_{\text{ВН}} = 0,083 \cdot K_{\text{T}} \cdot \left(0,09296 \cdot \left(0,6708 - 0,00545 \frac{R}{R_{\text{max}}} + 0,00021 \cdot I - 0,196hH \cdot [1,3055 + 0,00432T - 0,01639V - 0,0000012 \varphi] \right) \right), \quad (2)$$

- формальдегида:

$$C_{\text{ВН}} = 0,275 \cdot K_{\text{T}} \cdot \left(0,30912 \cdot \left(0,6708 - 0,00545 \frac{R}{R_{\text{max}}} + 0,00021 \cdot I - 0,196hH \cdot [0,1742 + 0,000589T - 0,000355V - 0,0000008\varphi] \right) \right), \quad (3)$$

- углеводородов алифатических (C1-C5):

$$C_{\text{ВН}} = 2 \cdot K_{\text{T}} \cdot \left(0,02119 \cdot \left(0,6708 - 0,00545 \frac{R}{R_{\text{max}}} + 0,00021 \cdot I - 0,196 \frac{h}{H} \right) \right) \cdot [0,384454 + 0,09053T - 0,02963V - 0,000001\varphi], \quad (4)$$

где $\frac{R}{R_{\text{max}}}$ – отношение расстояния от магистрали до здания к максимальному расстоянию, на котором обнаружена концентрация от магистрали, м; I – интенсивность автотранспорта, авт./час; $\frac{h}{H}$ – отношение высоты от поверхности земли h к высоте здания H ; T – температура атмосферного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; V – скорость воздуха, м/с; φ – относительная влажность воздуха, %; K_{T} – поправочный коэффициент типа застройки (таблица 5).

На основе зависимостей авторами разработана программа для ЭВМ: «Расчет концентраций загрязнителей внутри помещений многоэтажных зданий по времени суток от автотранспортных магистралей в городской среде: свидетельство государственной регистрации 2022610810 Рос. Федерация №2021682453 / Литвинова Н.А., Азаров В.Н.; заяв. 29.12.2021, опублик. 17.01.22». Программа внедрена при проектировании объектов строительства и для зданий в эксплуатации с целью прогноза степени загрязнения воздуха

внутри помещений зданий по высоте этажей в течение суток. Отображает результат в виде таблиц. Экспортирует результаты в файлы Excel.

Таблица №5

Поправочные коэффициенты К типа локальной застройки: наветренная/
подветренная стороны здания от магистрали

I, авт./час	Торцевая	Строчная	Периметральная	Торцевая под углом	Смешанная
до 500	0,99/0,77	0,76/0,66	1,0 / 0,37	0,54/0,44	0,32/0,22
500–1000	0,99/0,88	0,86/0,76	1,0/0,47	0,64/0,54	0,42/0,34
1000–2000	0,99/0,95	0,968/0,86	1,0/0,61	0,75/0,64	0,52/0,43
2000–3000	0,99/0,97	0,99/0,96	1,0/0,75	0,84/0,78	0,62/0,53

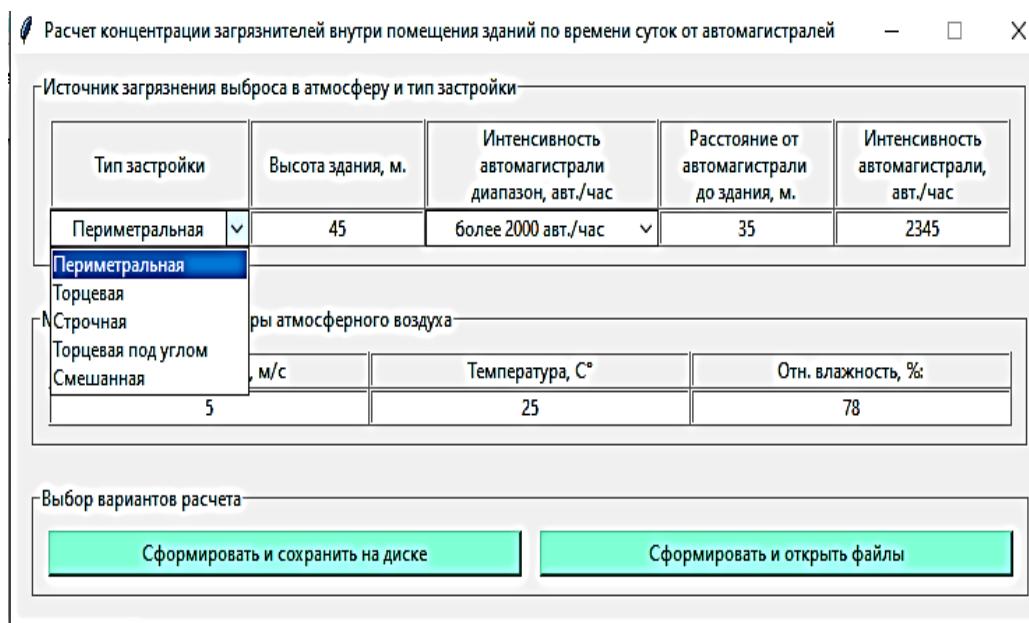
Исходные данные для расчета: высоты здания H , м; интенсивность автотранспортной магистрали, авт./час: от 500 авт./час; от 500–1000; от 1000–2000; выше 2000 авт./час; расстояние от магистрали до здания R_i , м. Выбирается тип застройки: торцевая; строчная; периметральная; торцевая под углом; смешанная. Вводятся метеорологические параметры (рис.2).

Заключение

1. Превышения в 2-3 раза от ПДК_{сс} внутри и снаружи зданий отмечены при периметральной застройке как снаружи, так и внутри помещения: с 8 до 10 часов для оксид углерода (II) увеличивается на 43-45%, с 17 до 20 часов – на 40-41%; для фенола с 17-20 часов – увеличивается на 47%, для формальдегида – с 8 до 10 часов и с 17 до 20 часов на 60-61%, для углеводородов алифатических – на 61%.

2. В режиме проветривания в воздушной среде внутри здания концентрация загрязнителей достигает до 80-88,5% от концентрации по наружной стене здания, при закрытых проемах от 21,2 до 46,2%.

3. На основе многофакторных уравнений регрессии разработана программа для ЭВМ, позволяющая спрогнозировать концентрацию загрязнителей внутри здания по времени суток. Исходные данные для расчета: высота здания H , м; интенсивность автотранспортной магистрали, авт./час; расстояние от магистрали до здания R_i , м; тип застройки.



Расчет концентрации загрязнителей внутри помещения зданий по времени суток от автомагистралей

Тип застройки	Высота здания, м.	Интенсивность автомагистрали диапазон, авт./час	Расстояние от автомагистрали до здания, м.	Интенсивность автомагистрали, авт./час
Периметральная	45	более 2000 авт./час	35	2345

Выбор вариантов расчета

Скорость ветра, м/с	Температура, С°	Отн. влажность, %:
5	25	78

Сформировать и сохранить на диске Сформировать и открыть файлы

Рис. 2. – Окно ввода исходных данных в программу (пример)

Литература

1. Донцова Т.В., Храпов С.С., Азаров В.Н. О моделировании динамики переноса примесей в атмосфере городов // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №12. С. 67-72.
2. Владимиров Е. А. Численное моделирование распространения пассивной примеси в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1999. № 7. С. 22-34.
3. Yiqun H., Zhu T. Health effects of fine particles (PM2.5) in ambient air // Science China Life Sciences. 2015. №58. Pp. 624-626.

4. Rothenberg S. J., Nagy P. A., Pickrell J. A. Surface Area, Adsorption, and Desorption Studies on Indoor Dust Samples // American Industrial Hygiene Association Journal. 1989. №50:1. Pp. 15-23. DOI: 10.1080/15298668991374255.

5. Xing Y.F., Xu Y.H., Shi M.H., Lian Y.X. The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system // J Thorac Dis. 2016. №8 (1). Pp. 69-74. DOI: 10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19.

6. Samoli E., Analitis A., Touloumi G. Estimating the exposure-response relationships between particulate matter and mortality within the APHEA multicity // Environ Health Pers. №113 (1). Pp. 88-95.

7. Gallego E., Roca F.X, Guardino X, Rosell M.G. Indoor and outdoor BTX levels in Barce-lona City metropolitan area and Catalan rural areas // Journal of Environmental Sciences. 2008. №20 (9). Pp. 1063-1069.

8. Азаров В.Н., Ребров В.А., Козловцева Е.Ю., Азаров А.В., Добринский Д.Р., Тertiшников И.В., Поляков И.В., Абухба Б.А. О совершенствовании алгоритма компьютерной программы анализа дисперсного состава пыли в воздушной среде // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y20185/49769.

9. Азаров В.Н., Барикаева Н.С., Николенко Д.А., Соловьева Т.В. Об исследовании загрязнения воздушной среды мелкодисперсной пылью с использованием аппарата случайных функций // Инженерный вестник Дона, 2015, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3350.

10. Иванова Ю. П., Сахарова А. А., Иванова О. О., Азарова М. Д. Исследование климатических параметров как факторов, влияющих на загрязнение городской воздушной среды линейного города // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 214—219.

References

1. Doncova T.V., Hrapov S.S., Azarov V.N. Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2013. №12. pp. 67-72.
2. Vladimirov E. A. Meteorologiya i gidrologiya. 1999. № 7. pp. 22-34.
3. Yiqun H., Zhu T. Science China Life Sciences. 2015. №58. Pp. 624-626.
4. Rothenberg S. J., Nagy P. A., Pickrell J. A. American Industrial Hygiene Association Journal. 1989. №50:1. Pp. 15-23. DOI: 10.1080/15298668991374255.
5. Xing Y.F., Xu Y.H., Shi M.H., Lian Y.X. J Thorac Dis. 2016. №8 (1). Pp. 69-74. DOI: 10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19.
6. Samoli E., Analitis A., Touloumi G. Environ Health Pers. №113 (1). Pp. 88-95.
7. Gallego E., Roca F.X, Guardino X, Rosell M.G. Journal of Environmental Sciences. 2008. №20 (9). Pp. 1063-1069.
8. Azarov V.N., Rebrov V.A., Kozlovceva E.Ju., Azarov A.V., Dobrinskij D.R., Tertishnikov I.V., Poljakov I.V., Abuhba B.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y20185/49769.
9. Azarov V.N., Barikaeva N.S., Nikolenko D.A., Solov'eva T.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3350.
10. Ivanova YU. P., Saharova A. A., Ivanova O. O., Azarova M. D. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. 2021. Vyp. 1 (82). pp. 214—219.