



Разработка цифровой модели работы систем вентиляции

Введение

Основными источниками поступления веществ в атмосферу являются автотранспорт (83 %) и выбросы от стационарных источников — промышленных предприятий (11 %). В зависимости от силы воздействия вредные вещества делят на четыре класса: I — чрезвычайно опасные; II — высокоопасные; III — умеренно опасные; IV — малоопасные. В атмосферном воздухе вредные вещества могут содержаться в виде газов, паров, аэрозолей. Наибольший вред жизнедеятельности человека наносят оксид углерода, оксиды азота, диоксид серы, сероводород, хлор, аммиак, пары свинца, ртути.

Критерием качества воздуха является предельно допустимая концентрация (ПДК) загрязняющих веществ в воздухе. Она определяется количеством вредного вещества в 1 м³ воздуха, не влияющего на здоровье человека, постоянно находящегося под его воздействием.

По характеру воздействия на организм человека токсичные вещества условно подразделяют на:

- общетоксические — вызывают отравление всего организма (оксид углерода, цианистые соединения, свинец, ртуть, бензол и др.);
- раздражающие — вызывают раздражение дыхательных путей и слизистых оболочек (хлор, аммиак, диоксид серы, оксиды азота, фтористый водород и др.);
- сенсibilизирующие — вызывают аллергию (формальдегид, растворители и лаки на основе нитросоединений и др.);
- канцерогенные — вызывают онкологические заболевания (никель и его соединения, амины, оксиды хрома, асбест и др.);
- мутагенные — приводят к изменению генетической информации (свинец, марганец, радиоактивные вещества и др.);
- влияющие на репродуктивную функцию (ртуть, свинец, стирол, марганец, радиоактивные вещества и др.).

Выделяют вещества фиброгенного действия (различные виды пыли), не взаимодействующие с биологическими жидкостями, но оседающие в бронхах и лёгких и вызывающие раздражение слизистых оболочек дыхательных путей.

Рецензия эксперта на статью получена 08.05.2023 [The expert review of the article was received on May 8, 2023]

УДК 621.1.016. Научная специальность: 2.1.3 (05.23.03).

Разработка цифровой модели работы систем вентиляции комплексов Москвы

С. В. Гузов, к.т.н., доцент, директор Центра подготовки и профессиональной переподготовки «Энергоменеджмент и энергосберегающие технологии», [Московский энергетический институт \(НИУ «МЭИ»\)](#); **А. А. Арбатский**, к.т.н., генеральный директор НИИ «Инженерных климатических систем и электроники»; **Д. С. Утка**, студент, [НИУ «МЭИ»](#); **А. О. Сорокина**, студент, [НИУ «МЭИ»](#)

Для соблюдения санитарно-гигиенических норм в современных торгово-развлекательных комплексах необходимо поддерживать постоянный воздухообмен в помещениях. Системы подготовки воздуха для общеобменной вентиляции требуют комплексных мер по поддержанию на минимальных уровнях концентраций различных вредных веществ. Соблюдение требований к предельно допустимым концентрациям вредных веществ важно в свете повышенной загазованности на автомагистралях, особенностей розы ветров, сложной экологической обстановки в некоторых районах мегаполиса. Ежегодно в атмосферу города Москвы выбрасывается около одного миллиона загрязняющих веществ [1]. Для реализации автоматизированного управления системами дополнительной очистки воздуха необходимо создание цифровой модели с применением нейросетевого прогнозирования. В статье показаны требуемые к контролю параметры содержания вредных веществ в воздухе. Оценён объём информационной базы и период накопления информации для создания цифровой модели.

Ключевые слова: общеобменная вентиляция, цифровая модель, база данных, качество воздуха, торгово-развлекательный центр, нейросетевое прогнозирование, пылевые фильтры, микроклиматические параметры.

UDC 621.1.016. The number of scientific specialty: 2.1.3 (05.23.03).

Development of a digital model for the operation of ventilation systems

S. V. Guzhov, PhD, Associate Professor, director of the "Energy Management and Energy Saving Technologies" Center for Training and Professional Retraining, [Moscow Power Engineering Institute \(NRU "MPEI"\)](#); **A. A. Arbatsky**, PhD, general director of the "Engineering Climate Systems and Electronics" Scientific Research Institute; **D. S. Utka**, student, [NRU "MPEI"](#); **A. O. Sorokina**, student, [NRU "MPEI"](#)

In order to comply with sanitary and hygienic standards in modern shopping and entertainment complexes, it is necessary to maintain constant air exchange in the premises. Air preparation systems for general exchange ventilation require comprehensive measures to maintain concentrations of various harmful substances at minimum levels. Compliance with the requirements for the maximum permissible concentrations of harmful substances is important in the light of increased gas pollution on highways, the peculiarities of the wind rose, the difficult environmental situation in some areas of the metropolis. About one million pollutants are emitted into the atmosphere of Moscow every year [1]. To implement automated control of additional air purification systems, it is necessary to create a digital model using neural network forecasting. The article shows the parameters required for the control of the content of harmful substances in the air. The volume of the information base and the period of accumulation of information for creating a digital model are estimated.

Key words: general ventilation, digital model, database, air quality, shopping and entertainment center, neural network forecasting, dust filters, microclimatic parameters.

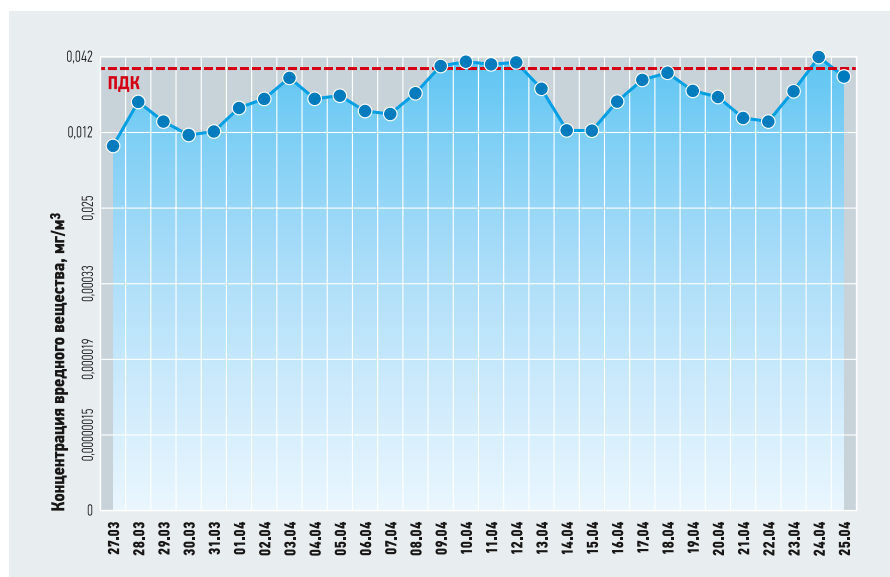


Рис. 1. Содержание в воздухе PM2.5 в марте — апреле на станции АСКЗА «МКАД 105 восток» [8]

Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны не должно превышать величин ПДК, используемых при проектировании производственных зданий, технологических процессов, оборудования, вентиляции, для контроля за качеством производственной среды и профилактики неблагоприятного воздействия на здоровье работающих.

Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны подлежит систематическому контролю для предупреждения возможности превышения ПДК. Предельно допустимыми концентрациями [2–7] перечисленных выше газов, представляющих наибольшую опасность для здоровья человека, являются: оксид углерода — 20 мг/м³, оксиды азота — 5 мг/м³, диоксид серы — 10 мг/м³, сероводород — 10 мг/м³,

Сравнительная характеристика ПДК загрязняющих веществ и их действительной концентрации в воздухе вблизи автотрасс в Москве [9] табл. 1

Загрязнитель	ПДК	Уровень в городе Москве
Оксид углерода	5	0,2
Диоксид азота	0,2	0,061
Оксид азота	0,4	0,2
Диоксид серы	0,5	0,001
Взвешенные частицы PM10	0,3	0,009
Взвешенные частицы PM2.5	0,16	0,2

хлор — 5 мг/м³, аммиак — 20 мг/м³, пары свинца — 0,01 мг/м³, ртути — 0,01 мг/м³. В Москве доминирующим загрязнителем является PM2.5 — мелкодисперсная пыль (табл. 1, рис. 1), состоящая из твёрдых частиц и мелких капелек жидкостей с размером от 10 нм (нанометров) до 2,5 мкм

Filter, HEPA). Такие фильтры, как правило, сделаны из нетканого волокнистого материала, который способен задерживать даже самые мелкие загрязнения. Среди бытовых очистителей встречаются модели, фильтры которых прошли тестирование и сертифицированы на фильтрацию

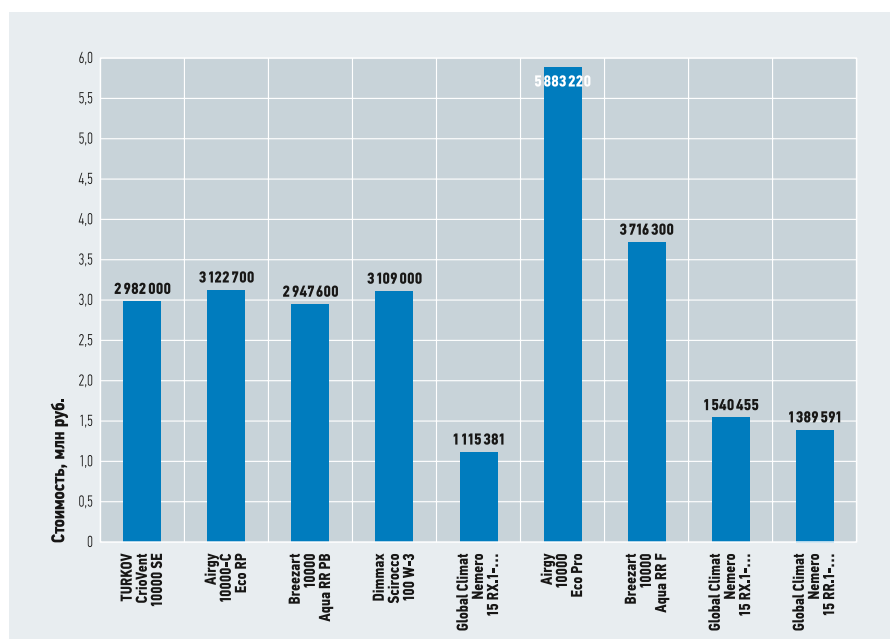


Рис. 2. Стоимость вентиляционных установок на 10 тыс. м³/ч [10]

В городе Москве доминирующим загрязнителем являются частицы PM2.5, то есть мелкодисперсная пыль, состоящая из твёрдых частиц и мелких капелек жидкостей размером от 10 нм до 2,5 мкм

частиц размером 0,5 мкм и менее, причём с эффективностью не менее 99 %. Лидером считаются фильтры HyperHEPA, которые задерживают частицы размером от 0,003 мкм с эффективностью более 99,5 %.

2. Наличие системы фильтров для борьбы с загрязнениями разного происхождения и агрегатного состояния. Как правило, в бытовых очистителях, кроме HEPA-фильтра, должен быть ещё угольный фильтр, который борется с запахами и газообразными загрязнениями.



Предварительный фильтр задерживает крупную пыль, волосы и другие загрязнения, защищая остальные фильтры, что позволяет им дольше работать с максимальной эффективностью.

3. Для общественных зданий допускается применение роторных рекуператоров с продувочным сектором, исключающим попадание вытяжного воздуха в тракт приточного воздуха, а также при необходимости можно устанавливать после рекуператора дополнительные фильтры и обеззараживатели на тракте приточного воздуха после установки или на входе в обслуживаемые помещения.

Требования к подвижности воздуха для категорий работ:

1. Холодный период года:

- «Лёгкая — 1а» категория (оптимальная 0,1 м/с, допустимо не более 0,1 м/с);
- «Лёгкая — 1б» (оптимальная 0,1 м/с, допустимая не более 0,2 м/с);
- «Средней тяжести — 2а» (оптимальная 0,2 м/с, допустимая не более 0,3 м/с);
- «Средней тяжести — 2б» (оптимальная 0,2 м/с, допустимая не более 0,4 м/с);
- «Тяжёлая — 3» (оптимальная 0,3 м/с, допустимая не более 0,5 м/с).

2. Тёплый период года:

- «Лёгкая — 1а» категория (оптимальная 0,1 м/с, допустимая 0,1–0,2 м/с);
- «Лёгкая — 1б» (оптимальная 0,2 м/с, допустимая 0,1–0,3 м/с);
- «Средней тяжести — 2а» (оптимальная 0,3 м/с, допустимая 0,2–0,4 м/с);
- «Средней тяжести — 2б» (оптимальная 0,3 м/с, допустимая 0,2–0,5 м/с);
- «Тяжёлая — 3» (оптимальная 0,4 м/с, допустимая 0,2–0,6 м/с).

В зависимости от функционального назначения здания нормативными и регламентирующими документами устанавливаются

ливаются разные требования к параметрам воздуха. Основные показатели качества воздушной среды помещений:

- температура (оптимальное значение 18–22 °С по [ГОСТ 30494–2011](#));
- уровень относительной влажности (оптимальное значение 45–35 % по [ГОСТ 30494–2011](#));
- скорость перемещения воздуха (не более 0,2 м/с по [ГОСТ 30494–2011](#));
- кратность воздухообмена (от 400 до 1000 см³/м³ по [ГОСТ 30494–2011](#));
- отсутствие болезнетворных бактерий (не более 500 колоний бактерий в 1 м³, [ГОСТ Р 50677–94](#)).

Для фильтрации PM2.5 в вентиляционной системе торгово-развлекательных комплексов рекомендуется использовать систему с центральным кондиционером и HEPA-фильтром или эквивалентным.



После входной вентиляционной решётки воздух проходит через механический фильтр для удаления крупных частиц и загрязнений. Затем воздух проходит через вентиляционный канал, который регулируется клапаном для регулирования потока воздуха



После входной вентиляционной решётки воздух проходит через механический фильтр для удаления крупных частиц и загрязнений. Затем воздух проходит через вентиляционный канал, который регулируется клапаном для регулировки потока воздуха. Далее вентилятор приводит воздушный поток в движение и направляет его через фильтр HEPA или эквивалентный, который улавливает все частицы размером 2,5 мкм и менее.

Далее воздух проходит нагреватели и затем с помощью вентилятора подаётся в комнату, которую нужно обслуживать. После прохождения через комнату воздух покидает систему через выходной вентиляционный канал.

Таким образом, схема вентиляции с центральным кондиционером и фильтром HEPA или эквивалентным позволяет создать комфортные условия в помещении и обеспечить фильтрацию PM2.5 в общеобменной вентиляции торгово-развлекательных комплексов.

Принципиальная схема вентиляционной установки представлена на рис. 3.

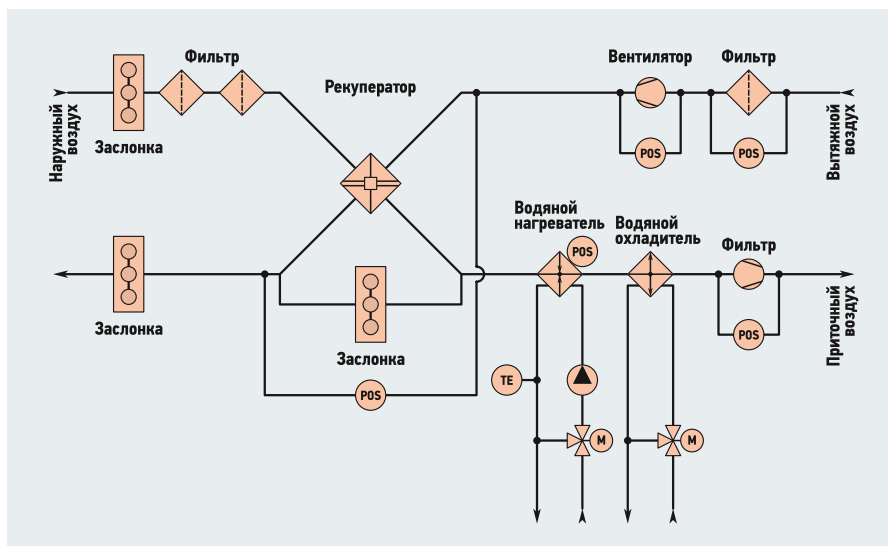


Рис. 3. Схема вентиляционной установки

Определение объема базы данных цифровой модели для оптимизации системы общеобменной вентиляции

На основании проведенного анализа необходимого состава центральных кондиционеров для зданий торгово-развлекательных центров, становится возможным сформировать перечень регистрируемых параметров для следующих типов систем центрального кондиционирования. Мониторинг изменения электропотребления выполняют промышленные счетчики электроэнергии. Дополнительные функции: ведение журнала энергопотребления, управление энергией, включение в АСУЭ, устойчивость к электромагнитным полям. Вентиляционная установка с возможностью вариации производительности использует инверторный вентилятор или вентилятор с возможностью изменения числа оборотов, позволяющий плавно изменять скорость вращения приводного вала нагнетателя. Используются приборы: анемометр, термопара, дифференциальный датчик давления. Дроссельные устройства и приводы — группа элементов, управляющаяся от микропро-

цессорного устройства и осуществляющая контроль, регулировку и установление аэродинамического режима системы и пр.

В помещении поддержание требуемых микроклиматических параметров осуществляется за счет датчиков, регистрирующих и передающих информацию об изменении термодинамических величин. Регулировка влажности осуществляется прямым регулированием (непосредственно в помещении) или косвенным методом (по температуре точки росы после камеры орошения). Во втором случае устанавливается двухступенчатая система нагревателей. Такие системы при решении задач снижения уровня пыли и микроорганизмов в воздухе имеют недостатки (табл. 2).

На основании приведенного перечня становится возможным оценить информационную базу для обработки посредством искусственной нейронной сети. Приведенные выше 14 блоков параметров имеют ёмкость не реже ежечасного измерения; проводить измерения ежеминутно — не целесообразно.

Далее принята интенсивность измерения раз в пять минут. Каждый блок пара-

метров должен иметь основной и дублирующий каналы измерений для каждой из имеющихся установок. Принят объём измерителей для одной вентиляционной установки — не менее девяти единиц.

Число входных каналов в матрице исходных данных:

$$14 [\text{ед. блоков параметров}] \times 9 [\text{ед. измерителей для одной вентиляционной установки}] = 126 \text{ ед.}$$

Объём базы исходных данных:

$$525\,600 [\text{мин. в году}] / 5 \text{ мин.} [\text{периодичность измерений}] = 105,1 \text{ тыс. строк в год.}$$

Подобный объём данных наиболее эффективен с точки зрения точности и скорости обработки данных. Его необходимо обрабатывать посредством создания цифровой модели с применением нейросетевого прогнозирования.

Разработка цифровой модели системы вентиляции с помощью нейросетевого прогнозирования позволит проводить различные сценарные моделирования, выполнять задачу оптимизации параметров загрузки системы в зависимости от самых различных входных условий.

Например, можно определять оптимальный режим вентиляции для разных уровней загазованности на близлежащих дорогах, различной активности посещения горожанами данных комплексов, особенностей розы ветров, разовых волн загрязняющих веществ, смога, сезонных выбросов пыльцы растениями и пр. ●

Недостатки схем при снижении уровня пыли и микроорганизмов в воздухе

табл. 2

Недостатки	Способ нивелирования
Пылевые фильтры способны удалять из воздуха только механические загрязнители	Необходимо производить периодическое измерение степени загрязнения воздуха механическими загрязнителями после фильтра
Загрязнители накапливаются на фильтрующих элементах, и при несвоевременной замене сам фильтр становится источником загрязнения	Необходимо производить периодическое измерение степени загрязнённости фильтра
Отсутствие инактивации микроорганизмов на фильтре [10]. При замене фильтрующий элемент опасен для окружающих (на нём могут размножаться болезнетворные микроорганизмы)	Необходимо производить периодическое измерение эффективности проводимой инактивации микроорганизмов в фильтре
Некоторые фильтры имеют малую ёмкость по улавливаемым загрязнителям и, соответственно, требуют частой замены	Необходимо производить периодическое измерение степени наполненности ёмкости фильтра
При залповых выбросах может происходить проскок загрязнителей	Необходимо производить on-line измерение степени загрязнения воздуха после фильтра
При несвоевременной замене угольный фильтр становится источником микробиологических и химических загрязнителей	Необходимо производить on-line измерение степени загрязнения угольного фильтра

1. Московский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (МосЦГМС) [Электр. текст]. ФГБУ «Центральное УГМС». Режим доступа: esomos.ru. Дата общ.: 10.05.2023.
2. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания / Дата введ.: 01.03.2021.
3. Р 2.1.10.1920–04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Дата введ.: 05.03.2004.
4. РД 52.04.186–89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы / Дата введ.: 01.07.1991.
5. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях / Дата введ.: 01.01.2013.
6. ГОСТ 12.1.005–88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны / Дата введ.: 01.01.1989.
7. Об утверждении СанПиН 2.1.3.2630–10 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям, осуществляющим медицинскую деятельность»: Постановление Главного гос. санитарного врача РФ от 18.05.2010 №58.
8. Станция измерения воздуха «МКАД 105 восток» [Электр. текст]. Режим доступа: mosecom.mos.ru. Дата общ.: 10.05.2023.
9. Экологическая ситуация города Москвы. Обобщённая информация о качестве воздуха в Москве [Электр. текст]. Режим доступа: mosecom.mos.ru. Дата общ.: 10.05.2023.
10. Оборудование для очистки воздуха в медицинских учреждениях [Электр. текст]. TION. Режим доступа: pro.tion.ru. Дата общ.: 10.05.2023.

References — see page 79.

Development of a digital model for the operation of ventilation systems. Pp. 66–69.

Sergey V. Guzhov, PhD, Associate Professor, director of the “Energy Management and Energy Saving Technologies” Center for Training and Professional Retraining, [Moscow Power Engineering Institute \(NRU “MPEI”\)](#); **Andrey A. Arbatsky**, PhD, general director of the “Engineering Climate Systems and Electronics” Scientific Research Institute; **Dmitry S. Utka**, student, [NRU “MPEI”](#); **Anna O. Sorokina**, student, [NRU “MPEI”](#)

1. *Moskovskij centr po gidrometeorologii i monitoringu okruzhajushhej sredy (MosCGMS)* [Moscow Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring]. FGBU “Central’noe UGMS” [“Central Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring” Federal State Budgetary Institution]. Web-source: [ecomos.ru](#). Access date: May 10, 2023. [In Russian]
2. *SanPiN 1.2.3685–21* [Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations of Russia (Russian Public Health Regulations) No. 1.2.3685–21]. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniju bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlja cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Date of impl.: Mart 1, 2021. [In Russian]
3. *R 2.1.10.1920–04* [Prescriptive Guideline No. 2.1.10.1920–04]. *Rukovodstvo po ocenke riska dlja zdorov’ja naselenija pri vozdejstvii himicheskikh veshhestv, zagryaznjajushhikh okruzhajushhuju sredu* [Air Pollution Control Guide]. Date of impl.: Mart 5, 2004. [In Russian]
4. *RD 52.04.186–89* [Guideline No. 52.04.186–89]. *Rukovodstvo po kontrolju zagryaznenija atmosfery* [Guidelines for assessing the risk to public health when exposed to chemicals that pollute the environment]. Date of impl.: July 1, 1991. [In Russian]
5. *GOST 30494–2011* [State Industry Standard of Russia No. 30494–2011]. *Zdanija zhilye i obshhestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshhenijakh* [Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters]. Date of impl.: January 1, 2013. [In Russian]
6. *GOST 12.1.005–88* [State Industry Standard of Russia No. 12.1.005–88]. *Obshhie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozduhu rabochej zony* [General sanitary and hygienic requirements for the air of the working area]. Date of impl.: January 1, 1989. [In Russian]
7. *Ob utverzhdenii SanPiN 2.1.3.2630–10 “Sanitarno-jepidemiologicheskie trebovaniya k organizatsijam, osushhestvlyajushhim meditsinskuju dejatel’nost’”* [On the approval of Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations of Russia (Russian Public Health Regulations) No. 2.1.3.2630–10 “Sanitary and epidemiological requirements for organizations engaged in medical activities”]. *Post. Glavnogo gos. sanitarnogo vracha RF ot 18.05.2010 №58* [Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 58 dated May 18, 2010]. [In Russian]
8. *Stantsija izmerenija vozduha “MKAD 105 vostok”* [“MKAD 105 East” air measurement station]. Web-source: [mosecom.mos.ru](#). Access date: May 10, 2023. [In Russian]
9. *Jekologicheskaja situatsija goroda Moskvy. Obobshhjonnoj informatsija o kachestve vozduha v Moskve* [Ecological situation of the city of Moscow. Generalized information on air quality in Moscow]. Web-source: [mosecom.mos.ru](#). Access date: May 10, 2023. [In Russian]
10. *Oborudovanie dlja ochistki vozduha v meditsinskikh uchrezhdenijakh* [An equipment for air purification in medical institutions]. *TION*. Web-source: [pro.tion.ru](#). Access date: May 10, 2023. [In Russian]