

На правах рукописи



ЛИТВИНОВА НАТАЛЬЯ АНАТОЛЬЕВНА

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИТОЧНЫХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМЫ
ВЕНТИЛЯЦИИ ЗДАНИЙ**

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и
освещение

2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Тюмень – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

Научный консультант:

Азаров Валерий Николаевич

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

Аверкова Ольга Александровна

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Белгородский
государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова», профессор
кафедры «Теплогазоснабжение и
вентиляция»

Зиганшин Арслан Маликович

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
доцент кафедры «Теплоэнергетика,
газоснабжение и вентиляция»

Гурова Оксана Сергеевна

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»,
профессор кафедры «Инженерная защита
окружающей среды»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный
университет имени В.И. Вернадского»

Защита диссертации состоится 06 июля 2023 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.419.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», по адресу: 625001, г. Тюмень, ул. Луначарского, д.2, конференц-зал. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и на сайте www.tyuiu.ru.

Автореферат разослан «04» апреля 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Степанов Максим Андреевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном строительстве многоэтажных зданий в настоящее время устанавливаются клапаны естественной вентиляции по всей высоте здания для увеличения воздухообмена и дополнительного проветривания помещений. Появилась необходимость применения воздухозаборных устройств с эффективной очисткой приточного воздуха в зданиях, расположенных в городской среде, с повышенным загрязнением атмосферного воздуха от внешних источников выброса. Наружный воздух многоэтажных жилых и административных зданий крупных городов загрязнен различными газообразными веществами от выбросов автотранспорта, котельных малой мощности, особенно на границах санитарно-защитных зон, от точечных источников с небольшой высотой выброса над поверхностью земли.

При расчёте параметров приточного воздуха зданий и для улучшения воздушного режима помещений учитывать степень загрязнения воздушной среды газообразными веществами по всей высоте здания достаточно сложно. При проектировании приточных воздухозаборных устройств, в том числе и приточных клапанов систем вентиляции, необходимо представить исходные данные для расчёта параметров приточного воздуха по всей высоте зданий.

В связи с этим актуальным является разработка теоретически и экспериментально обоснованных методов расчёта параметров приточных устройств в зависимости от степени загрязнения наружного воздуха на основе методик для прогноза вертикального распределения концентраций загрязняющих газообразных веществ по высоте зданий с учётом градостроительных типологий застройки отдельных районов города. Это позволит сократить выполнение расчётов и трудоёмких экспериментальных исследований для выявления исходных параметров приточного воздуха, мониторинга загрязнения наружного воздуха по высоте зданий и улучшит качество воздушной среды многоэтажных зданий, которые находятся в эксплуатации, а также для вновь проектируемых объектов строительства на территории РФ.

Актуальность и необходимость работы согласуется с национальным проектом, который реализуется с 2018 года Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ в рамках паспорта проекта «Жильё и городская среда» (утв. от 24.12.2018 г. N 16), затрагивающего вопросы формирования комфортной и безопасной городской среды городов РФ, повышение индекса качества городской среды на 30 %, где первыми критериями являются безопасность, комфорт, экологичность.

Таким образом, разработка и совершенствование приточных устройств системы вентиляции, решение технологических задач приточной вентиляции в зависимости от вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей в наружном воздухе по высоте зданий от передвижных и точечных источников выброса, с учетом типа локальной застройки, перемещения воздушных масс внутри застройки, исследований по высоте теплового, воздушного, влажностного режимов помещений зданий является одним из важнейших факторов обеспечения экологической безопасности воздушной среды в зонах возведения строительных комплексов, на границах санитарно-защитных зон промышленных предприятий, вблизи оживленных магистралей, создания благоприятных условий жизнедеятельности населения и моделирование качества атмосферного воздуха городской среды, поступающего в здания на территории РФ.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научных специальностей 2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки), п. 2, 4, 5. и 2.1.10 Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки), п. 3, 6.

Объект исследования – воздушная среда снаружи и внутри зданий, расположенных вблизи наружных источников выброса.

Предмет исследования – вертикальное загрязнение наружного и внутреннего воздуха зданий в городской среде газообразными загрязнителями в зависимости от температурно-влажностных параметров, скоростного режима воздушной среды.

Для решения данных задач в качестве основных загрязнителей воздушной среды приняты – оксид углерода (II) от теплоэнергетических объектов, оксид углерода (II) и органические газообразные загрязнители: углеводороды алифатические (C1-C5), формальдегид, фенол от выбросов автотранспорта.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в изучение способов очистки приточного воздуха с помощью системы вентиляции для зданий городской среды внесли работы: Власенко В.М., Дацюк Т.А., Кривошеина А.Д., Соловьева С.А., Турутина Н.В., Белоключева Г.М., Ильина В.Г., Ливчак В.И., Провадкина Г.Г., Малетина А.А., Ерохина С.Н., Симаненкова С.И., Гладышева Н.Ф., Золотушкина А.А., Сержантова В.Г., Кумпаненко И.В., Лосева В.В., Шеляпина И.П., Гагарина В.Г., Аверкина А.Г., Васильева Н.П., Романчук Э.В., Замаева Б.К., Дейкун М.М., Ермакова А.И., Довидчук А.Н., Клапишевского А.С., Цьомык А.М., Баткалова А.Я., Куренкова А.Ю., Могутова В.А., Пяткина С.В., Трубицына Д.А., Волкова Д.С., Севрюгина С.А., Сазонова Э.В., Петрова Е.В., Филиппова Т.Н., Brevsse, P. A., Challoner, G., Charles O., Francisco P.W., Jacobs D.E., Targos L., Dixon S.L., Breysse J., Rose W., Jones, N. L. Longo, L.D. и другие.

Проблемой изучения качества атмосферного воздуха в городской среде занимались такие учёные как Антропов К.М., Азаров В.Н., Безуглая Э.Ю., Владимиров Е.А., Тасейко О.В., Грачев Ю.Г., Мягков М.С., Гримсруд Д.Т., Губернский Д.Т., Диденко Ю.Д., Зайнишев В.Г., Лобачева А.В., Мусина У.И., Сидоренко В.Ф., Донцова Т.В., Шелейховский Г.В., Шерман М.А., Малявина Е.Г., Кузьмичев А.В., Кузьмичев А.А., Кумпаненко И.В., Лосев В.В., Шеляпин И.П., Васильев Н.П., Романчук Э.В., Замаев Б.К., Дейкун М.М., Ермаков А.И., Довидчук А.Н., Хэдлиш Д.Е., Чернявский С.А., Sun X.Y., Dai Y.J., Ge T.S., Zhao Y., Wang R.Z., Ballesta P.P., Field R.A., Connolly R., Cao N., Baeza Caracena A., De Saeger E., Chan L.Y., Liu Y.M., Gupta K.N., Rao N.J., Agarwal G.K. и др.

По итогам анализа литературных источников сделан вывод о том, что на сегодняшний день проведены многочисленные исследования вертикального распределения концентраций дисперсных частиц (пыли) в городской среде. Недостаточно изучено вертикальное распределение концентраций газообразных загрязнителей от наружных источников выброса для проектирования приточных устройств системы вентиляции с учётом типа локальной застройки, изменяющихся по величине и направлению скоростей ветра вблизи зданий. Необходимо разработать методы и алгоритмы расчёта параметров приточных устройств в зависимости от степени загрязнения наружного воздуха по высоте зданий на основе теоретических и экспериментальных исследований.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное обоснование влияния вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей наружного воздуха для проектирования эффективных и безопасных конструкций приточных устройств вентиляции по высоте зданий, создании основ теории их расчёта и внедрения в практику проектирования систем приточной вентиляции для многоэтажного строительства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать опыт исследований по оценке влияния закономерностей вертикального распределения концентраций загрязняющих веществ в наружном воздухе по высоте зданий на выбор способов и защитных средств приточных устройств систем вентиляции от газообразных загрязнителей в городской среде.

2. Теоретически и экспериментально обосновать методики расчёта для прогнозирования вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей от точечных и передвижных источников выброса для учёта степени загрязнения приточного воздуха зданий при разных градостроительных типологиях застройки, изменяющихся по величине и по направлению скоростей ветра по высоте зданий внутри застройки.

3. Экспериментально исследовать влияние вертикального распределения концентраций загрязнителей, скорости ветра, температуры, влажности наружного воздуха по высоте зданий на качество воздуха и микроклиматические параметры в помещениях.

4. Провести экспериментальные исследования вариантов очистки приточного воздуха зданий от газообразных загрязнителей с помощью разработанной конструкции устройства клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха помещений по высоте в наружной стене здания; экспериментально исследовать влияние температуры, влажности и скорости движения наружного воздуха по высоте зданий на процессы очистки приточного воздуха.

5. Теоретически и экспериментально обосновать инженерно-технические методы и способы снижения концентраций газообразных загрязнителей по высоте зданий: конструкцию устройства для очистки приточного воздуха зданий; метод расчёта параметров клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха; способ очистки приточного воздуха зданий от газообразных загрязнителей при различных температурно-влажностных и скоростных параметрах воздушной среды.

6. Внедрить в практику проектирования приточных устройств систем вентиляции зданий разработанную конструкцию клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха, способ очистки приточного воздуха, метод и алгоритмы расчета параметров устройства с использованием разработанных методик расчёта степени вертикального загрязнения воздуха по высоте зданий, с подтверждением эффективности предложенных технических решений на основе опытных испытаний, разработанного программного обеспечения.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- впервые установлена зависимость величины интенсивности УФ-излучения с длиной волны 365 нм (6-12 Вт) от расстояния от УФ-ламп до пористой пластины диоксида титана TiO_2 совместно с послойно расположенными сорбентами (шунгит, цеолит) для повышения эффективности очистки приточного воздуха помещений от концентраций загрязнителей: оксида углерода (II), алифатических углеводородов (C1-C5), фенола, формальдегида в клапанах приточной вентиляции зданий;

- теоретически и экспериментально установлена закономерность влияния очередности послойного расположения сорбентов (шунгита, цеолита, силикагеля) и их пропорциональные соотношения масс, для сорбентов определенного фракционного состава в слоях при наличии катализатора (диоксида марганца) на эффективность очистки приточного воздуха помещений зданий от оксида углерода (II), алифатических углеводородов (C1-C5), фенола, формальдегида;

- впервые теоретически и экспериментально разработан метод расчёта параметров клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха, позволяющий при расходе воздуха от 55 до 300 м³/ч подобрать технические и физико-химические характеристики загрузок фильтров по высоте зданий;

- теоретически и экспериментально разработан алгоритм расчёта для прогнозирования параметров приточного воздуха, качества воздуха внутри помещений по высоте зданий в режиме проветривания в зависимости от вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей, вертикального распределения ветровых нагрузок, температуры и влажности наружного воздуха;

- теоретически и экспериментально обоснована методика расчёта для прогнозирования вертикального распределения концентраций оксида углерода (II) по высоте зданий в наружном воздухе от точечных источников выброса, учитывающая вертикальные изменяющиеся по направлению и величине ветровые нагрузки зданий, типологию локальной застройки для выбора мест воздухозаборных устройств, в которых требуется очистка приточного воздуха, обоснования технологических режимов систем приточной вентиляции;

- теоретически и экспериментально обоснована методика расчёта для прогнозирования вертикального распределения концентраций оксида углерода (II), фенола, формальдегида, углеводородов алифатических по высоте зданий в наружном воздухе от передвижных источников (автомагистралей), учитывающая вертикальные изменяющиеся по направлению и

величине ветровые нагрузки зданий, типологию локальной застройки для выбора мест воздухозаборных устройств, в которых требуется очистка приточного воздуха;

- впервые экспериментально доказана закономерность изменения величины концентраций газообразных загрязнителей передвижных источников в приточном воздухе по высоте здания от градостроительных типологий локальной застройки, вертикального распределения ветровых нагрузок наружного воздуха, времени суток, интенсивности движения магистрали, что дает возможность проводить мониторинг качества воздуха по высоте зданий для воздухозаборных устройств.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- теоретически и экспериментально обоснована методология определения параметров клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха, позволяющая определить при расходах приточного воздуха от 55 до 300 м³/ч технические и физико-химические характеристики загрузок фильтров устройств для различного времени их использования по высоте зданий;

- теоретически и экспериментально обоснована методология прогнозирования вертикального загрязнения газообразными загрязнителями в наружном воздухе по высоте здания в зависимости от вертикального распределения изменяющихся по величине и направлению скоростей ветра наружного воздуха, распределения максимальной концентрации загрязнителей по высоте здания, типа локальной застройки. Это позволит прогнозировать исходные параметры приточного воздуха, проводить мониторинг качества воздуха по высоте зданий, обосновать необходимость очистки приточного воздуха в местах расположения воздухозаборных устройств на разных высотах для зданий в эксплуатации, при проектировании новых объектов строительства;

- конкретизирован срок службы загрузок фильтров разработанных клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха: сорбентов (шунгит, цеолит, активированный уголь, силикагель) и катализатора (диоксида марганца) на основе полученных эмпирических зависимостей концентраций загрязняющих веществ от продолжительности очистки;

- построены эпюры и поверхности закономерностей изменения концентраций газообразных загрязнителей от источников выброса (точечных и передвижных) в наружном воздухе по высоте здания, позволяющие проводить долгосрочный прогноз степени вертикального загрязнения зданий в местах возможных воздухозаборов;

- получены поправочные коэффициенты для определения концентраций газообразных загрязнителей, позволяющие учитывать тип локальной застройки (строчная, периметральная, торцевая, смешанная) при расчётах параметров приточного воздуха от точечных и передвижных источников;

- получен долгосрочный прогноз концентраций газообразных загрязнителей внутри проектируемых объектов строительства в режиме проветривания помещений по высоте зданий на основе теоретических и эмпирических зависимостей концентраций загрязнителей от параметров температуры, влажности и скорости движения наружного воздуха;

- разработана конструкция устройства клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха в местах размещения воздухозаборных устройств от газообразных загрязнителей: оксида углерода (II), углеводородов алифатических (C1-C5), фенола, формальдегида в наружном воздухе по высоте здания (патент на изобретение № 2 744623). Конструкцию клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха можно использовать в строительных организациях при проектировании жилых, административных зданий в местах воздухозаборов по высоте зданий вблизи наружных источников выброса;

- разработан эффективный способ очистки приточного воздуха зданий от оксида углерода (II), углеводородов алифатических (C1-C5), фенола, формальдегида, поступающих в помещения от наружных источников выброса, позволяющий повысить в приточных устройствах систем вентиляции качество очистки приточного воздуха до ПДК загрязнителей внутри помещений зданий с эффективностью до 91,18-99,88% (патент на изобретение №2 747863);

- разработаны программы для ЭВМ: расчёта и обоснования технических характеристик загрузок фильтров клапанов приточной принудительной вентиляции с очисткой воздуха (№2020660657, 09.09.2020); прогноза (расчета) концентраций загрязнителей в приточном воздухе по высоте зданий от точечных или передвижных источников выброса (№2020618133, 20.07.2020); прогноза загрязнения внутри помещений по времени суток от автотранспорта (№ 2022610810 от 29.12.2021); сводного расчета вертикального распределения безразмерных концентраций газообразных загрязнителей по высоте зданий с учётом типа локальной застройки (№2021664849 от 14.09.2021).

Методология и методы диссертационного исследования: комплекс существующих базовых экспериментальных методов по отбору проб воздушной среды внутреннего и наружного воздуха; метод электрохимический; вероятностно-статистические методы обработки результатов экспериментальных исследований наружного и внутреннего воздуха зданий; аналитические зависимости процессов вертикального загрязнения воздушной среды зданий городской среды от факторов наружного воздуха получены с использованием уравнения массопереноса газообразных веществ в течение времени, по уравнению турбулентной диффузии (общему уравнению Гаусса); уравнению газовой динамики по Бюргерсу; математическое моделирование процесса сорбции в конструкции разработанного устройства на границах раздела фаз газ-твердое вещество (сорбент) по Фрейндлиху.

Положения, выносимые на защиту:

- зависимость величины интенсивности УФ-А-излучения с длиной волны 365 нм (6-12 Вт) от расстояния от УФ-ламп до пористой пластины диоксида титана TiO_2 совместно с послойно расположенными сорбентами (шунгитом, цеолитом) для повышения эффективности очистки приточного воздуха помещений до 90,61-97 % от концентраций загрязнителей: оксида углерода (II), алифатических углеводородов (C1-C5), фенола, формальдегида в клапанах приточной вентиляции зданий;

- закономерность влияния очередности послойного расположения сорбентов (шунгита, цеолита, силикагеля) и их пропорциональные соотношения масс, для сорбентов определенного фракционного состава в слоях при наличии катализатора (диоксида марганца) для повышения качества очистки приточного воздуха помещений зданий до 91,18-99,88% от оксида углерода (II), алифатических углеводородов (C1-C5), фенола, формальдегида;

- метод расчёта параметров клапанов приточной принудительной вентиляции с очисткой воздуха позволяет при расходах приточного воздуха от 55 до 300 м³/ч подобрать технические и физико-химические характеристики загрузок фильтров устройств с сорбентами (шунгита, цеолита, активированного угля, силикагеля);

- алгоритм расчёта прогнозирования качества наружного и внутреннего воздуха зданий в режиме проветривания помещений определяет параметры приточного воздуха и величину концентраций газообразных загрязнителей в зданиях городской среды в зависимости от вертикального распределения их концентраций по высоте здания в наружном воздухе с учётом типа локальной застройки, метеорологических факторов наружного воздуха;

- техническое решение конструкции клапанов приточной принудительной вентиляции для эффективной очистки воздуха по высоте зданий в местах размещения воздухозаборных устройств с учётом закономерностей вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей в наружном воздухе;

- методика расчёта для прогнозирования вертикального распределения концентраций оксида углерода (II) по высоте зданий в наружном воздухе от точечных источников выброса, позволяющая учитывать вертикальные поля изменяемых по величине и направлению скоростей ветра, тип локальной застройки, определить место воздухозаборных устройств, в которых требуется очистка приточного воздуха, обосновать технологические режимы систем приточной вентиляции;

- методика расчёта для прогнозирования вертикального распределения концентраций оксида углерода (II), фенола, формальдегида, углеводородов алифатических по высоте зданий от автомагистралей учитывает вертикальные поля изменяемых по величине и направлению

скоростей ветра наружного воздуха, тип локальной застройки; расстояние от магистрали до зданий; величины интенсивности движения автотранспорта, позволяет прогнозировать качество и параметры приточного воздуха в местах воздухозаборов;

- закономерность изменения величины концентраций газообразных загрязнителей передвижных источников в приточном воздухе по высоте здания от градостроительных типологий локальной застройки, вертикального распределения ветровых нагрузок наружного воздуха, времени суток, интенсивности движения магистрали для воздухозаборных устройств.

Личный вклад автора заключается в проведении многолетних экспериментальных исследований в течение 2006-2021 гг., в постановке целей и задач исследований, организации и проведении экспериментов (отбор проб воздуха, измерение температурно-влажностных и скоростных параметров по высоте зданий), разработке опытного образца клапанов приточной вентиляции для теоретических и экспериментальных исследований качества воздушной среды зданий, разработке способа очистки приточного воздуха от газообразных загрязнителей, методах расчёта параметров приточных устройств с очисткой воздуха по высоте зданий, интерпретации и обобщении результатов экспериментальных исследований. Все методы и алгоритмы расчёта реализованы в разработанных автором компьютерных программах, имеющих государственную регистрацию.

Степень достоверности результатов исследования представленных в работе основных научных положений, сформулированных выводов и разработанных рекомендаций обоснована применением фундаментальных основ теории массопереноса, уравнения турбулентной диффузии, сорбции загрязняющих газообразных веществ в воздушной среде, современного сертифицированного оборудования, а также использованием методик проведения научных исследований с доверительной вероятностью 0,95, получением прогнозируемых результатов в практической реализации.

Апробация. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на Международных и Всероссийских научно-практических конференциях, наиболее значимые из них: Международная научно-практическая конференция «Экологические проблемы регионов» (г. Москва, 2010 г.), Международная конференция «Инновационное развитие современной науки» (г. Уфа, 2015 г.), Международная конференция «Современные тенденции в фундаментальных и прикладных исследованиях» (г. Рязань, 2015 г.), Международная научно-практическая конференция «Безопасность в техносфере» (г. Бристоль, Великобритания, 2017 г.), Международная конференция «Проблемы техносферной безопасности» (г. Барнаул, 2018), Международная конференции «Новые технологии - нефтегазовому региону» (г. Тюмень, 2018-2019 гг.), Международная конференция «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (г. Челябинск, 2019 г.), Международная научно-практическая конференция (г. Москва, 2020 г.), Международный фестиваль Архитектуры «Экобрег» (г. Волгоград, 2022 г.). По результатам работы получены награды: диплом и медаль лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года – 2016» (исследования), г. Москва, 2017 г., диплом победителя регионального конкурса проектов по номинации «ЧИСТЫЙ ГОРОД» Управления по экологии департамента городского хозяйства администрации г. Тюмени, 2017 г., диплом Международной премии «ECOWORD», 30 ноября, 2017 г., Золотой сертификат 2019 г. Международного конкурса фонда им. В.И. Вернадского, г. Москва, медаль и областная премия им. В.И. Муравленко, выданная Тюменской областной думой, губернатором Тюменской области «За реализацию целевых природоохранных программ и мероприятий, направленных на обеспечение экологической безопасности и оздоровление окружающей среды» (Постановление областной Думы от 01.08.2019 г, протокол № 9).

Результаты работы внедрены: при проектировании приточной вентиляции в административных зданиях ООО «Уралмаш НГО Холдинг», ПАО «Сибур ТюменьГаз», жилых многоэтажных зданиях ОАО «Тюменская домостроительная компания» используется разработанная конструкция клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха, способ очистки приточного воздуха от газообразных загрязнителей, поступающих в здания. Технико-экономический эффект от внедрения результатов работы обусловлен повышением качества

очистки приточного воздуха при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий. В ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии по Тюменской области», отделе санитарно-гигиенических исследований (испытательной лаборатории) Роспотребнадзора, ООО «Уралмаш НГО Холдинг», ПАО «Сибур ТюменьГаз» внедрены: программы для ЭВМ, имеющие государственную регистрацию, апробированы для прогноза концентраций загрязнителей в наружном воздухе по высоте зданий и обоснования места размещения воздухозаборов с необходимой очисткой воздуха, мониторинга качества атмосферного воздуха городской среды; разработанные рекомендации используются Управлением по экологии департамента городского хозяйства администрации г. Тюмени. Результаты диссертационной работы включены в план мероприятий согласно Закону «О стратегическом планировании социально-экономического развития Тюменской области» от 06.12.2017 N 94, от 23.03.2018 N 28), что подтверждается присуждением Областной премии им. В.И. Муравленко «За реализацию целевых природоохранных комплексных программ и мероприятий, направленных на обеспечение экологической безопасности окружающей среды» (от 01.08.2019 г, протокол № 9).

Публикации. По материалам диссертации опубликована **81** научная работа, в том числе **6** статей опубликованы в изданиях, входящих в наукометрические базы цитирования: Scopus - **5**, WoS – **1**; **25** статей – в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ, **5** монографий, **6** объектов интеллектуальной собственности: **2** патента на изобретения, **4** авторских свидетельства государственной регистрации на программы для ЭВМ; **39** статей, опубликованных в сборниках Международных и Всероссийских научно-практических конференций, **18** из которых приведены в автореферате.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает введение, **6** глав, выводы, список литературы и приложения. Общий объём работы составляет **460** страниц, включая **379** страниц основного машинописного текста, включающего **131** таблиц и **145** рисунков, список литературы, состоящий из **450** наименований и изложенный на **47** страницах, а также **3** приложений, изложенных на **32** страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи исследования, представлена научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость. Также определена концепция диссертационной работы, методологическая база исследований, апробация работы и реализация результатов проведенного исследования.

Первая глава посвящена изучению причин поступления приточного загрязненного воздуха в здания городской среды от точечных и передвижных источников выброса, анализу недостатков методов и способов очистки приточного воздуха помещений от газообразных загрязнителей, существующих моделей распределения концентраций загрязнителей по высоте зданий в наружном воздухе от внешних источников выброса.

При анализе работ отечественных и зарубежных учёных выяснено, что существующие способы и средства защиты качества приточного воздуха зданий могут привести к значительному загрязнению воздуха помещений газообразными загрязнителями при расположении их в районах с оживленными транспортными магистралями и другими источниками выброса. Использование в настоящее время моделей рассеивания газообразных загрязнителей требует учета вертикального распределения концентраций загрязнителей по высоте здания и вертикального распределения скоростей ветра, его направления вблизи зданий, учета величины максимальной концентрации загрязнителей по высоте здания, типа локальной застройки для определения необходимости очистки приточного воздуха.

Вторая глава «Теоретическое и экспериментальное обоснование методики расчёта вертикального распределения концентраций загрязнителей с учётом типа локальной застройки для прогнозирования качества приточного воздуха» посвящена теоретическим основам и закономерностям загрязнения приточного воздуха по высоте зданий, получению аналитических и полуэмпирических уравнений для расчёта величины скорости движения

наружного воздуха по высоте здания, многофакторному анализу качества наружного воздуха по высоте зданий от точечных источников и автотранспорта. Получены зависимости многофакторных регрессий по результатам многолетних экспериментальных исследований с 2006-2021 гг., теоретически и экспериментально обоснованы методики расчёта для прогнозирования концентраций газообразных загрязнителей (оксида углерода (II), фенола, формальдегида, углеводородов алифатических) по высоте зданий в приточном воздухе. Построены эпюры и поверхности закономерностей изменения концентраций загрязнителей наружного воздуха по высоте зданий, проведено сравнение результатов расчёта степени загрязнения приточного воздуха по разработанной методике и общепринятых методик расчёта концентраций загрязнителей в наружном воздухе.

Предложенная методика расчёта для прогнозирования вертикального загрязнения приточного воздуха от наружных источников включает:

1. Входящие параметры: вид источника выброса (точечный, передвижной источник), в зимний и летний периоды параметры приточного воздуха: скорость ветра, м/с; температура, К; давление, мм.рт.ст. (атм.); роза ветров, по основным румбам, %; расстояние от источника до здания R_i , м; высота здания H , м; длина здания $L_{\text{здания}}$, м; массы выбросов загрязняющих веществ, г/с (мг/ч); плотность застройки, тип локальной застройки: периметральная; торцевая; строчная; торцевая под углом; смешанная, для точечных источников: высота источника $H_{\text{и}}$, м; отношение высоты источника к высоте здания $H_{\text{и}}/H$; в случае присутствия передвижных источников: расстояние от магистрали до здания R_i , м; интенсивность движения автотранспорта I , авт./ч: до 500 авт./ч; 500-1000 авт./ч; 1000-2000 авт./ч; свыше 2000 авт./ч.

2. Принимаются поправочные коэффициенты в зависимости от типа локальной застройки (табл.1,2) для расчёта концентраций загрязняющих веществ по высоте здания от точечных источников с наветренной (I) и подветренной (II) сторон здания, от передвижных источников при различной интенсивности движения магистралей.

3. Определяются величины проекций скоростей наружного воздуха по всей высоте здания по уравнению (2) с учётом длины локальной застройки, длины здания, высоты от поверхности земли, температуры наружного воздуха, температуры выброса; угла направления ветра к застройке.

4. Расчёт вертикального загрязнения приточного воздуха от наружных источников на основе определения безразмерных концентраций газообразных загрязнителей с учётом максимальной концентрации вредных веществ по высоте зданий по уравнениям (7),(14)-(15), (17), молекулярной массы воздуха и загрязнителей, температуры, скорости движения воздуха по высоте от поверхности земли, давления наружного воздуха.

5. Проводится сводный расчёт загрязнения приточного воздуха вредными веществами по высоте от поверхности земли вблизи зданий от нескольких наружных источников выбросов с наветренной и подветренной сторон, уравнение (18).

6. Определяются высоты h_{i_z} от поверхности земли у зданий, где концентрации загрязнителей от источников выброса превышают допустимую норму и требуется очистка приточного воздуха.

Рассмотрен вектор скорости \vec{V}_i за время Δt . Скорость ветра на квартал равна v_0 отличается от скорости ветра на высоте h_{i_z} от поверхности земли у здания от $V_i \dots \dots$ до V_n внутри квартала до высоты всего здания H .

Величина скорости ветра наружного воздуха зависит по высоте от поверхности земли вблизи зданий от типа локальной застройки. Вектор скорости \vec{V}_i за время Δt проходит расстояние l длины квартала от источника выброса. Проекция вектора скорости в трех ортогональных системах координат имеет вертикальную и горизонтальную составляющую. В качестве исходного уравнения для получения скорости на высоте V_i вблизи здания выбрано уравнение Тасейко О.В.:

$$V_i = V_t + \frac{l}{\Delta t}, \quad (1)$$

где V_t – термическая составляющая скорости ветра, м/с; $\frac{l}{\Delta t}$ – динамическая составляющая скорости ветра, зависящая от турбулентности воздушного потока, м/с.

Представлена динамическая составляющая вектора скорости с учетом застройки при разных направлениях вектора скорости к застройке квартала. Получены аналитические зависимости проекции вектора вертикальной составляющей скорости ветра и горизонтальной скорости ветра в трехмерной системе координат с учетом застройки квартала, направления вектора скорости к застройке под углом α от 10 до 180 градусов и расстояния l в квартале, которое проходит газообразный загрязнитель в застройке:

$$V_i = \frac{h_{iz}}{\sin\alpha\Delta t} + \frac{l_{ix}}{\cos\alpha\Delta t} + \frac{L_{зданияу}}{\sin\alpha\Delta t} + \frac{g}{T} [(T'_0 - T) - [(\gamma - \gamma_a)h_c] \cdot t, \quad (2)$$

где h_{iz} – высота от поверхности земли у здания, м; l_{ix} – длина локальной застройки квартала, м; $L_{зданияу}$ – длина здания, м; α – угол направления ветра к застройке (от 0 до 180), в градусах; T'_0 – температура выброса, $^{\circ}\text{C}$; T – температура окружающего воздуха у земной поверхности, $^{\circ}\text{C}$; γ и γ_a – фактический и адиабатический вертикальные градиенты температуры до высоты застройки; T – средняя температура слоя, $^{\circ}\text{C}$; g – ускорение силы тяжести, м/с^2 ; h_c – высота подъема примеси, м; t – время подъема примеси до высоты h_{iz} , с.

С учётом рассмотрения уравнения массопереноса газообразного вещества (3) в течение изменяющегося времени t и скоростей ветра V_i по высоте от поверхности земли h_{iz} , получено уравнение (4) концентрации i - газообразной примеси от скоростей вблизи здания u, v, ω по высоте:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial c_0}{\partial t_0} + (u \cdot \frac{\partial c}{\partial z}) + (v \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + \omega \cdot \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial(\frac{g}{T}[(T'_0 - T) - [(\gamma - \gamma_a)h_c] \cdot t])}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial c_0}{\partial t_0} + (\frac{h_{iz}}{\sin\alpha\Delta t} \cdot \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{l_{ix}}{\cos\alpha\Delta t} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{L_{зданияу}}{\sin\alpha\Delta t} \cdot \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial(\frac{g}{T}[(T'_0 - T) - [(\gamma - \gamma_a)h_c] \cdot t])}{\partial t}, \quad (4)$$

где u, v, ω – изменяющиеся скорости ветра вблизи зданий по высоте, выраженные как проекции векторов на три ортогональные оси с учетом направления ветров α к застройке, м/с.

По результатам обработки экспериментальных данных получена регрессионная зависимость (5) для расчёта концентрации оксида углерода (II) от точечных источников выброса (дымовых труб от котельных, объектов теплоэнергетики малой мощности):

$$C = 5,667 + 0,207 \cdot H_{и} - 0,099 \cdot H - 0,013 \cdot R_i - 0,037 \cdot h_i - 0,207 \cdot H_{и} \cdot H + 0,043 \cdot H_{и}^2, \quad (5)$$

где $H_{и}$ – высота источника, м; H – высота здания, м; R_i – расстояние от источника до здания, м; h_i – высота от поверхности земли, м.

Переменные $H_{и} \cdot R_i$; $H_{и} \cdot h_i$; $H \cdot R_i$; $h_i \cdot H$; $R_i \cdot h_i$; H^2 ; R_i^2 ; h_i^2 не являются значимыми, так как $|t| < t(0,05; 46)$, все остальные – значимые $|t| > t(0,05; 46)$ (критерий Стьюдента $t(0,05; 46) = 2,030$). Уравнение регрессии статистически надежно, с надежностью 95%.

На основании многолетних экспериментальных исследований концентраций загрязнителей в приточном воздухе по высоте зданий, подставлена зависимость (5) концентрации загрязнителя СО по высоте здания от точечных источников выброса, используя уравнение (6) турбулентной диффузии (общее уравнение Гаусса):

$$\frac{\partial(\frac{c_i}{c_{max}})}{\partial t} + V_i \cdot \frac{\partial(\frac{c_i}{c_{max}})}{\partial(\frac{R_i}{R_{max}})} = \frac{d}{d(\frac{H_{и}}{H})} k_{\frac{H_{и}}{H}} \cdot \frac{\partial(\frac{c_i}{c_{max}})}{\partial(\frac{H_{и}}{H})} + k_{\frac{h_i}{H}} \cdot \frac{\partial(\frac{c_i}{c_{max}})}{\partial(\frac{h_i}{H})} + \frac{a \cdot c_i}{c_{max}}, \quad (6)$$

где a – коэффициент, определяющий изменение концентрации за счет изменения примеси; V_i – скорость ветра по высоте от поверхности земли, м/с; k – составляющая коэффициента обмена; t – время, ч; $H_{и}$ – высота источника, м; H – высота здания, м; R_i – расстояние от источника до наружной стены здания, м; R_{max} – расстояние, на котором достигается максимально-приземная концентрация, м; h_i – высота от поверхности земли (этажа здания), м; c_i – концентрация загрязнителя на высоте h_i здания, мг/м^3 ; c_{max} – максимальная концентрация по высоте здания, мг/м^3 .

Так как примесь оксид углерода (II) устойчивая в атмосфере принимаем $a=1$. В связи с тем, что примесь сохраняется в атмосфере, то изменения концентраций CO со временем в атмосферном воздухе носит квазистационарный характер, то $\frac{\partial(\frac{c_i}{c_{max}})}{\partial t} = 0$.

Используя уравнение турбулентной диффузии (6) с заданными граничными условиями по осям: X (от 0 до $R_i/R_{max}=1$), Y (от $H_n/H=0,5$ до $H_n/H=2$), Z (от $h_i/H=0,1$ до $h_i/H=1$), после математических преобразований получено уравнение (7) вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей $\frac{c_i}{c_{max}}$ в приточном воздухе по высоте здания с учетом коэффициента диффузии по методу Гиллеленда, высоты каждого этажа здания (h_i), высоты здания (H) от точечных источников выброса:

$$\frac{c_i}{c_{max}} = -V_i \cdot \frac{0,130 \cdot (R_{max} - R_i)}{R_{max}^2} + \frac{0,400 \cdot T^{3/2}}{p \cdot (V_{M1}^3 + V_{M2}^3)^2} \cdot \left(\frac{M_1 + M_2}{M_1 \cdot M_2} \right)^{1/2} \cdot \left[\frac{0,415 \cdot (H^2 - H \cdot H_n)}{H^4} - \frac{0,037 \cdot (H - h_i)}{H^2} \right], \quad (7)$$

где H_n – высота источника, м; H – высота здания, м; R_i – расстояние от источника до наружной стены здания, м; R_{max} – расстояние, на котором достигается максимально – приземная концентрация, м; h_i – высота этажа здания, м; c_i – концентрация загрязнителя на высоте h_i здания, мг/м³; c_{max} – максимальная концентрация по высоте H здания, мг/м³; V_i – скорость ветра по высоте от поверхности земли h_i , м/с; T – температура воздуха, К; V_{M1} и V_{M2} – молярный объем воздуха и загрязняющего вещества при нормальных температурах кипения, см³/моль; M_1 ; M_2 – молярная масса воздуха и загрязняющего вещества, г/моль; p – атмосферное давление, атм.

Полученное уравнение (7) вертикального распределения безразмерных концентраций позволяет конкретизировать высоту от поверхности земли, где $\frac{c_i}{c_{max}} = 1$, то есть высоту, где концентрация газообразного загрязнителя максимальная в приточном воздухе зданий.

По результатам обработки экспериментальных данных получены регрессионные зависимости (8)-(11) для расчёта величины концентраций газообразных загрязнителей от передвижных источников (автотранспорта) в приточном воздухе по высоте зданий:

- оксида углерода (II):

$$\frac{c_i}{c_{max}} = 0,671 - 0,010 \cdot \frac{R_i}{R_{max}} + 0,021 \cdot I - 0,196 \cdot \frac{h_i}{H} + 0,038 \cdot \left(\frac{h_i}{H} \right)^2; \quad (8)$$

- углеводородов алифатических (C1-C5):

$$\frac{c_i}{c_{max}} = 2,119 \cdot \left(0,671 - 0,010 \cdot \frac{R_i}{R_{max}} + 0,021 \cdot I - 0,196 \cdot \frac{h_i}{H} + 0,038 \cdot \left(\frac{h_i}{H} \right)^2 \right); \quad (9)$$

- фенола:

$$\frac{c_i}{c_{max}} = 0,093 \cdot \left(0,671 - 0,010 \cdot \frac{R_i}{R_{max}} + 0,021 \cdot I - 0,196 \cdot \frac{h_i}{H} + 0,038 \cdot \left(\frac{h_i}{H} \right)^2 \right); \quad (10)$$

- формальдегида :

$$\frac{c_i}{c_{max}} = 0,309 \cdot \left(0,671 - 0,010 \cdot \frac{R_i}{R_{max}} + 0,021 \cdot I - 0,196 \cdot \frac{h_i}{H} + 0,038 \cdot \left(\frac{h_i}{H} \right)^2 \right), \quad (11)$$

где $\frac{c_i}{c_{max}}$ – отношение концентрации загрязнителя к его максимальной концентрации по высоте здания; $\frac{R_i}{R_{max}}$ – отношение расстояния от магистрали до здания к максимальному расстоянию, на котором обнаружена концентрация загрязнителя от магистрали, м; I – интенсивность движения автотранспорта, авт./ч; $\frac{h_i}{H}$ – отношение высоты от поверхности земли h_i к высоте здания H.

Переменные $\frac{R_i}{R_{max}} \cdot I$; $\frac{R_i}{R_{max}} \cdot \frac{h_i}{H}$; $\frac{h_i}{H} \cdot I$; $(I)^2$; $\left(\frac{R_i}{R_{max}} \right)^2$ не являются значимыми, так как $|t| < t(0,05; 69)$, все остальные – значимые $|t| > t(0,05; 69)$ (критерий Стьюдента $t(0,05; 69)=1,95$). Уравнение регрессии статистически надежно, с надежностью 95%.

Для учёта вертикального распределения безразмерных концентраций газообразных веществ в приточном воздухе по высоте зданий от передвижных источников использовано уравнение Бюргерса, которое описывает перемещение примеси в наружном воздухе под

действием скорости ветра. При этом c_i – концентрация загрязнителей, мг/м³; V_i – скорость ветра по высоте от поверхности земли h_i , м/с.

Представлено уравнение (12) с диффузионным слагаемым, уравнение переноса как функция от концентрации i – вещества c_i/c_{max} на высоте каждого этажа $\frac{h_i}{H}$: c_i к максимальной концентрации c_{max} по высоте здания H :

$$\frac{\partial(\frac{c_i}{c_{max}})}{\partial t} + V_i \frac{\partial(\frac{c_i}{c_{max}})}{\partial(\frac{h_i}{H})} = \varphi(\frac{c_i}{c_{max}}; \frac{h_i}{H}; H) \quad (12)$$

С учетом концентрации i – вещества на высоте здания $\frac{h_i}{H}$ к максимальной концентрации c_{max} по высоте здания H , коэффициента турбулентной диффузии D , м²/с получено уравнение (13):

$$\frac{\partial(\frac{c_i}{c_{max}})}{\partial t} + V_i \frac{\partial(\frac{c_i}{c_{max}})}{\partial(\frac{h_i}{H})} = D \frac{\partial^2(\frac{c_i}{c_{max}})}{\partial(\frac{h_i}{H})^2} \quad (13)$$

Используя зависимости концентраций СО по высоте здания (8)-(11) от нескольких факторов от автотранспорта, получаем уравнения (14)-(15), учитывая изменения величины безразмерной концентрации $\frac{c_i}{c_{max}}$ загрязняющих веществ, температуру воздуха и давление. Граничные условиями по осям: X (от 0 до $R_i/R_{max}=1$), Y (от $H_{и}/H=0,5$ до $H_{и}/H=2$), Z (от $h_i/H=0,1$ до $h_i/H=1$). Уравнения (14)-(15) изменения концентрации загрязнителей от расстояния (R_i до R_{max}) и по высоте от поверхности земли (h_i до H):

$$\frac{c_i}{c_{max}} = \frac{0,469 \cdot T^{3/2} \cdot (\frac{M_1+M_2}{M_1 \cdot M_2})^{1/2} \cdot (R_{max}-R_i)}{p(V_{M1}^3 + V_{M2}^3)^2 \cdot R_{max}^2} + \frac{0,545 \cdot V_i \cdot (R_{max}-R_i)}{R_{max}^2}, \quad (14)$$

$$\frac{c_i}{c_{max}} = \frac{0,169 \cdot T^{3/2} \cdot (\frac{M_1+M_2}{M_1 \cdot M_2})^{1/2} \cdot (H-h_i)}{p(V_{M1}^3 + V_{M2}^3)^2 \cdot H^2} + \frac{0,198 \cdot V_i \cdot (H-h_i)}{H^2}, \quad (15)$$

где V_i – скорость ветра по высоте от поверхности земли h_i , м/с; R_{max} – максимальное расстояние от магистрали до зданий, на котором обнаружена концентрация i -загрязняющего вещества, м; R_i – расстояние от магистрали до здания, м; H – высота здания, м; h_i – высота этажа, м; T – температура воздуха, К; V_{M1} и V_{M2} – молярный объем воздуха и загрязняющего вещества при нормальных температурах, см³/моль; M_1 ; M_2 – молярная масса воздуха и загрязняющего вещества, г/моль; p – атмосферное давление, атм.

Горизонтальная и вертикальная составляющие скоростей ветра принимают различные значения в зависимости от угла направления α ветров к застройке. Получено уравнение (17) концентрации i – газообразного загрязнителя в приточном воздухе $C_i(t)$ по высоте здания с учётом застройки, скорости ветра (16) на застройку v_0 , изменяющихся скоростей u, v, ω вблизи зданий по высоте, выраженных как проекции векторов на три ортогональные оси с учетом направления ветров α к застройке, используя уравнение (4), уравнения безразмерных концентраций газообразных загрязнителей от магистралей (14)-(15):

$$v_0 = \frac{G_i \cdot t}{l_{ix} \cdot (1 - \sqrt{c_{ds} + 0,5 \cdot c_{dh} \cdot (1 - \eta)} \cdot P \cdot \frac{\Sigma H}{b})}, \quad (16)$$

$$C_i(t) = \frac{0,169 \cdot T^{3/2} \cdot (\frac{M_1+M_2}{M_1 \cdot M_2})^{1/2} \cdot (H-h_i)}{p \cdot (V_{M1}^3 + V_{M2}^3)^2 \cdot H^2} + \frac{0,198 \cdot G_i \cdot (H-h_i) \cdot t}{H^2 \cdot \cos \alpha \cdot l_{ix} \cdot (1 - \sqrt{c_{ds} + 0,5 \cdot c_{dh} \cdot (1 - \eta)} \cdot P \cdot \frac{\Sigma H}{b})} + (\frac{h_{iz}}{\sin \alpha \cdot \Delta t} \cdot \frac{0,392 \cdot D \cdot (H-h_i)}{H^3} + \frac{l_{ix}}{\cos \alpha \cdot \Delta t} \cdot \frac{0,109 \cdot D \cdot (R_{max}-R_i)}{R_{max}^3} + \frac{L_{зданияу}}{\sin \alpha \cdot \Delta t} \cdot \frac{0,392 \cdot D}{H^3}) + \frac{g}{T} \cdot [(T'_0 - T) - [(\gamma - \gamma_a) \cdot h_c], \quad (17)$$

где v_0 – скорость ветра на квартал, м/с; R_{max} – максимальное расстояние от магистрали до зданий, на котором обнаружена концентрация i -загрязняющего вещества, м; R_i – расстояние от магистрали до здания, м; H – высота здания, м; T – температура окружающего воздуха у земной

поверхности на высоте $h_i, ^\circ\text{C}$; $V_{M1}; V_{M2}$ – молярный объем воздуха и загрязняющего вещества при нормальных температурах, $\text{см}^3/\text{моль}$; $M_1; M_2$ – молярная масса воздуха и загрязняющего вещества, $\text{г}/\text{моль}$; p – атмосферное давление, атм. ; D – коэффициент турбулентной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; h_i – высота от поверхности земли у здания, м ; G_i – масса выброса загрязняющего вещества, $\text{мг}/\text{ч}$; l_{ix} – длина квартала, м ; $L_{\text{зданияу}}$ – длина здания, м ; α – угол направления ветра к застройке (от 0 до 180), в градусах; T'_0 – температура выброса, $^\circ\text{C}$; γ и γ_a – фактический и адиабатический вертикальные градиенты температуры до высоты застройки; g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; h_c – высота подъема примеси, м ; t – время подъема примеси до высоты h_i , с ; C_{as} и C_{ah} – коэффициенты сопротивления поверхности и застройки; P – коэффициент плотности застройки; b – ширина здания, м ; η – проницаемость территории.

Сводный расчёт загрязнения приточного воздуха вредными веществами по высоте h_i от поверхности земли у зданий с учётом эффекта суммации для наветренной и подветренной сторон от нескольких источников выброса необходимо проводить по формуле (18):

$$\frac{C_i(\text{источник №1})}{C_{\text{max}}} + \frac{C_i(\text{источник №2})}{C_{\text{max}}} + \dots \dots \frac{C_i(\text{источник №n})}{C_{\text{max}}} \leq \frac{C_i}{C_{\text{пдк}}}, \quad (18)$$

где $C_i(\text{источник №1}), C_i(\text{источник №2}), \dots, C_i(\text{источник №n})$ – концентрации i -газообразных загрязняющих веществ, обладающих эффектом суммации, на высоте (h_i) от поверхности земли у зданий от точечных и передвижных источников, $\text{мг}/\text{м}^3$; C_{max} – максимальная концентрация по высоте здания H , $\text{мг}/\text{м}^3$; $\frac{C_i}{C_{\text{пдк}}}$ – предельно-допустимая безразмерная концентрация i -газообразного загрязняющего вещества.

На основе обработки экспериментальных данных для учёта типа локальной застройки получены поправочные коэффициенты для определения концентраций загрязняющих веществ по высоте зданий, где $H_{\text{и}}$ – высота источника, м и H – высота здания, м (табл.1), I – интенсивность движения магистрали (табл.3).

Таблица 1 – Поправочные коэффициенты учёта типа локальной застройки для определения концентраций загрязняющих веществ в приточном воздухе по высоте здания от точечных источников с наветренной (I) и подветренной (II) сторон

$H_{\text{и}}/H$	торцевая		строчная		периметральная		торцевая под углом		смешанная	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
2,5	0,570	0,513	0,320	0,220	0,950	0,765	0,560	0,460	0,768	0,668
2	0,667	0,601	0,445	0,345	0,960	0,829	0,677	0,577	0,667	0,567
1,5	0,827	0,744	0,556	0,456	0,980	0,904	0,744	0,644	0,556	0,456
1	0,974	0,877	0,667	0,567	0,990	0,977	0,650	0,550	0,445	0,345
0,5	0,999	0,967	0,768	0,668	1,0	0,989	0,541	0,441	0,321	0,221

По результатам обработки многолетних экспериментальных данных получены коэффициенты учёта интенсивности движения магистрали в приточном воздухе (табл.2).

Таблица 2 – Коэффициент учёта интенсивности движения магистрали

от 1000-2000 авт./ч	от 500-1000 авт./ч	до 500 авт./ч
0,19	0,13	0,0667

Таблица 3 – Поправочные коэффициенты учёта типа локальной застройки от передвижных источников: I – наветренная сторона / II – подветренная сторона, для различной интенсивности движения I, авт./ч

I, авт./ч	Торцевая I/II	Строчная I/II	Периметральная I/II	Торцевая под углом I/II	Смешанная I/II
до 500	0,99/0,777	0,768/0,668	1,0/0,375	0,541/0,441	0,321/0,221
500–1000	0,99/0,889	0,868/0,768	1,0/0,475	0,641/0,540	0,421/0,340
1000–2000	0,99/0,95	0,968/0,868	1,0/0,618	0,751/0,640	0,521/0,435
2000-3000	0,99/0,97	0,99/0,968	1,0/0,750	0,841/0,78	0,621/0,535

На основе полученных уравнений (7), (14)-(15), (17) построены эпюры вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей в приточном воздухе по высоте зданий при разных типах локальной застройки с наветренной и подветренной сторон от точечных источников выброса разной высоты: $H_{и}=2H$; $H_{и}=0,5H$; $H_{и}=H$, расстояние до здания $10H_{и}$; от магистралей с интенсивностью движения магистралей до 500; 500-1000; 1000-2000; 2000-3000 авт./ч, расстояние от магистралей до зданий от 30-50 м.

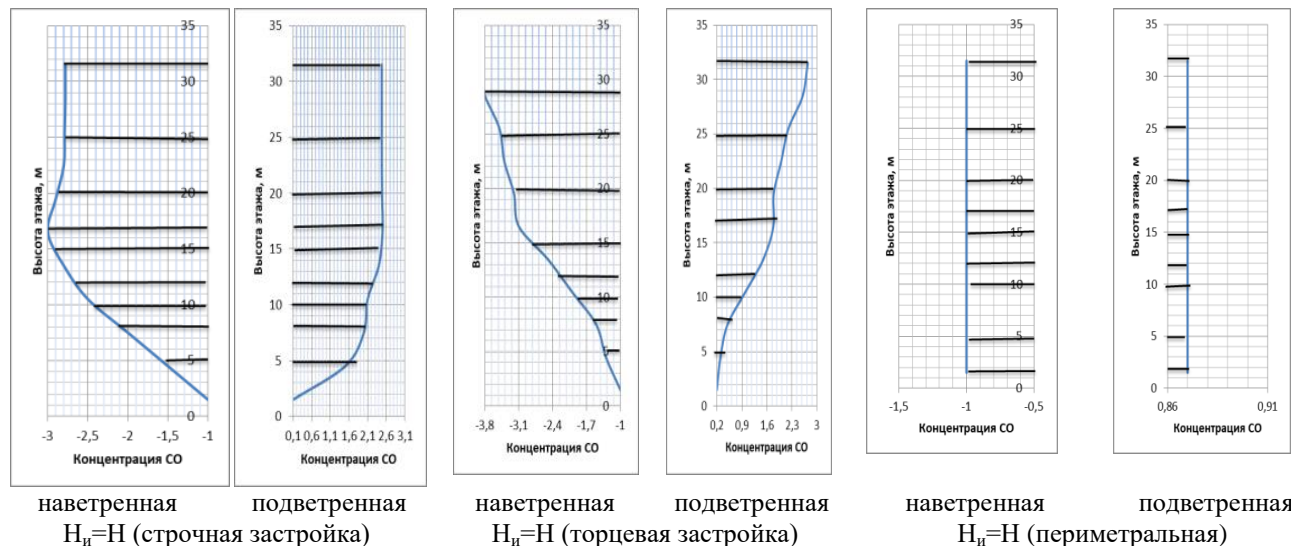


Рис.1. Эпюры концентраций CO в приточном воздухе по высоте зданий при различных типах локальной застройки от точечных источников высотой $H_{и}=H$ ($H_{и}$ – высота источника, м; H – высота здания, м)

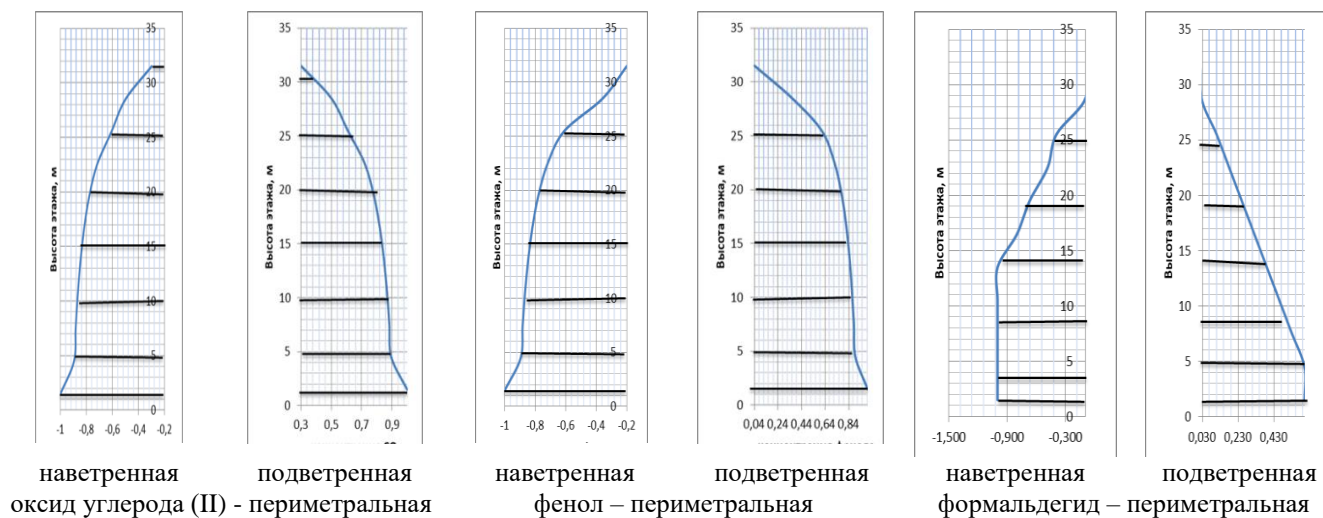


Рис.2. Эпюры концентраций газообразных загрязнителей в приточном воздухе по высоте зданий при периметральном типе локальной застройки от передвижных источников выброса: 1000-2000 авт./ч

На рис.1 представлены эпюры распределения величин концентраций загрязнителей по высоте зданий от источника высотой $H_{и}=H$ и зданий периметральной застройки от магистралей с интенсивностью движения 1000-2000 авт./ч (рис.2).

Экспериментальные исследования степени загрязнения приточного воздуха по высоте зданий при различных типах локальной застройки показали, что при строчной застройке концентрации загрязнителей с подветренной стороны уменьшаются от точечных и передвижных источников до 31,25% (13,02%), при торцевой – до 10% (2-3%), при периметральной – до 20% (25%), при торцевой под углом – до 17,86% (18,75%), при смешанной – до 12,11% (31,16%) соответственно.

По полученному уравнению (7) и экспериментальным данным построены поверхности для прогнозирования концентраций оксида углерода (II) CO в приточном воздухе по высоте зданий от точечных источников разной высоты (рис.3, а - 3, в) и концентраций оксида углерода (II), фенола, формальдегида, углеводородов алифатических от передвижных источников (рис.4, а – рис.4, в) по уравнениям (14)-(15). На рис.3-4 представлены h_i – высота от поверхности земли, м; H – высота здания, м; H_i – высота источника, м; R_i – расстояние от источника до здания, м; R_{max} – максимальное расстояние от магистрали до зданий, на котором обнаружена концентрация i -загрязняющего вещества, м; c – концентрация загрязнителя в наружном воздухе по высоте от поверхности земли, $мг/м^3$; c_{max} – максимальная концентрация по высоте здания, $мг/м^3$.

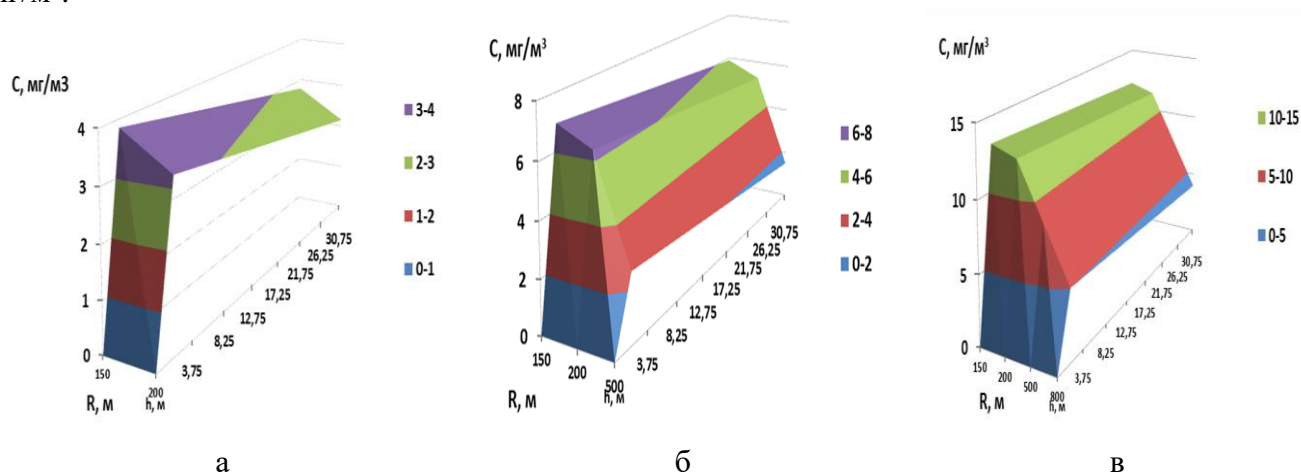


Рис.3. Поверхности для прогноза концентраций оксида углерода (II) в приточном воздухе по высоте зданий от точечных источников выброса высотой: а – $H_i=0,5H$; б – $H_i=H$; в – $H_i=2H$

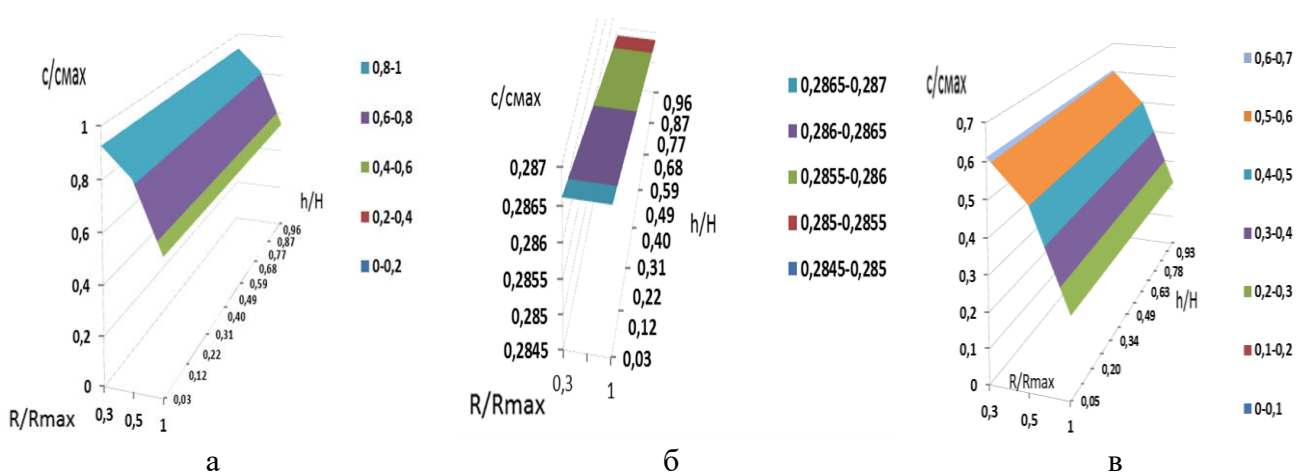


Рис.4. Поверхности для прогноза качества приточного воздуха по высоте зданий от магистралей с интенсивностью движения 2000 авт./ч: а – по оксиду углерода (II); б – по формальдегиду; в – по углеводородам алифатическим (C1-C5)

Анализ поверхностей среднегодовых концентраций CO по высоте зданий в наружном воздухе и на различных расстояниях от источников выброса позволяет найти требуемую высоту размещения приточных установок с очисткой воздуха (рис.3, а-в, рис.4, а-в).

В случае $\frac{c_i}{c_{max}} = 1$ концентрация загрязнителя максимальная по высоте здания $\frac{h_i}{H}$. Для расчета эффекта суммации нескольких веществ воздушной среды у здания учитываем суммацию безразмерных концентраций загрязняющих веществ по формуле (18) к максимальной концентрации по высоте H здания для наветренной и подветренной сторон.

Обобщение и анализ экспериментальных данных показал, что при расчётах концентраций загрязнителей от источников в наружном воздухе зданий необходимо учитывать

ряд факторов: тип локальных застроек, интенсивность движения автотранспорта магистралей (до 500; от 500-1000; 1000-2000; 2000-3000 авт./ч); наветренную или подветренную сторону здания от источника выброса. Достоверность полученных результатов составила (разница расчётных параметров и экспериментальных данных) не более 15%.

Доказано, что функция концентрации i -газообразного загрязнителя в наружном воздухе по высоте зданий от выбросов автотранспорта является случайной величиной и описывается разными законами распределения для времени суток, интенсивности движения магистралей, типа локальной застройки (табл.4).

Таблица 4 – Законы распределения функции $F(c_{hi})$ концентраций загрязнителей по высоте зданий от автотранспорта с 2006-2021 гг., периметрального типа локальной застройки

Загрязнитель	Закон распределения	$M(c_{hi})$	σ (дисперсия)
оксид углерода (II): дневное время	$F(c_{hi}) = \frac{1}{4,52\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c_{hi}-9,6)^2}{40}}$	9,6	4,52
ночное время	$F(c_{hi}) = \frac{1}{0,793\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c_{hi}-10,35)^2}{1,26}}$	10,35	0,793
фенол: дневное время	$F(c_{hi}) = \frac{1}{0,000144\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c_{hi}-0,0215)^2}{0,000000041}}$	0,0215	0,000144
ночное время	$F(c_{hi}) = \frac{1}{0,000108\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c_{hi}-0,022)^2}{0,000000023}}$	0,022	0,000108
формальдегид: дневное время	$F(c_{hi}) = \frac{1}{0,000239\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c_{hi}-0,0332)^2}{0,015540}}$	0,0332	0,000239
ночное время	$F(c_{hi}) = \frac{1}{0,000179\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c_{hi}-0,0262)^2}{0,0001791}}$	0,0269	0,000179
углеводороды алифатические: дневное время	$F(c_{hi}) = \frac{1}{0,344\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c_{hi}-1,933)^2}{0,2797}}$	1,933	0,344
ночное время	$F(c_{hi}) = \frac{1}{0,43\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c_{hi}-0,846)^2}{0,3698}}$	0,846	0,43

Таблица 5 – Законы распределения функции скоростей ветра (V), влажности (φ), давления (p) наружного воздуха по высоте зданий от 1,5 до 100 м с 2006-2021 гг. периметрального типа

Закон распределения	$M(c_{hi})$	σ	Среднее квадратичное отклонение
$F(V_{hi}) = \frac{1}{2,148V\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln V-3,45)^2}{9,22}}$	3,45	2,148	1,465
$F(\varphi_{hi}) = \frac{1}{351V\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln \varphi-63)^2}{246402}}$	63	351	18,735
$F(p_{hi}) = \frac{1}{709p\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln p-269)^2}{144722}}$	269	709	16,14

Параметры влажность, давление, скорость движения наружного воздуха по высоте зданий являются независимыми случайными величинами (табл.5).

Для других типов застроек законы распределения функции концентраций по высоте рассчитываются с учётом коэффициентов типа локальной застройки, полученных на основе экспериментальных данных (табл.3).

При прогнозе степени загрязнения приточного воздуха зданий по полученным уравнениям (14)-(17) с учётом типа застройки и общепринятых методик МРР 2017, зарубежных методик, реализованных в программах CaLINE 3, ENVI-met результаты степени загрязнения наружного воздуха зданий не учитывают тип локальной застройки, изменяющуюся по высоте и направлению скорость ветра воздушного потока вблизи зданий (рис.5). Расхождение с методиками расчёта тем больше, чем ближе расчетная точка к угловой зоне, где образуются

вторичные рециркуляционные течения (рис.5): зоны со скоростью ветра близкой к нулю, турбулизации воздуха у наружной стены зданий.

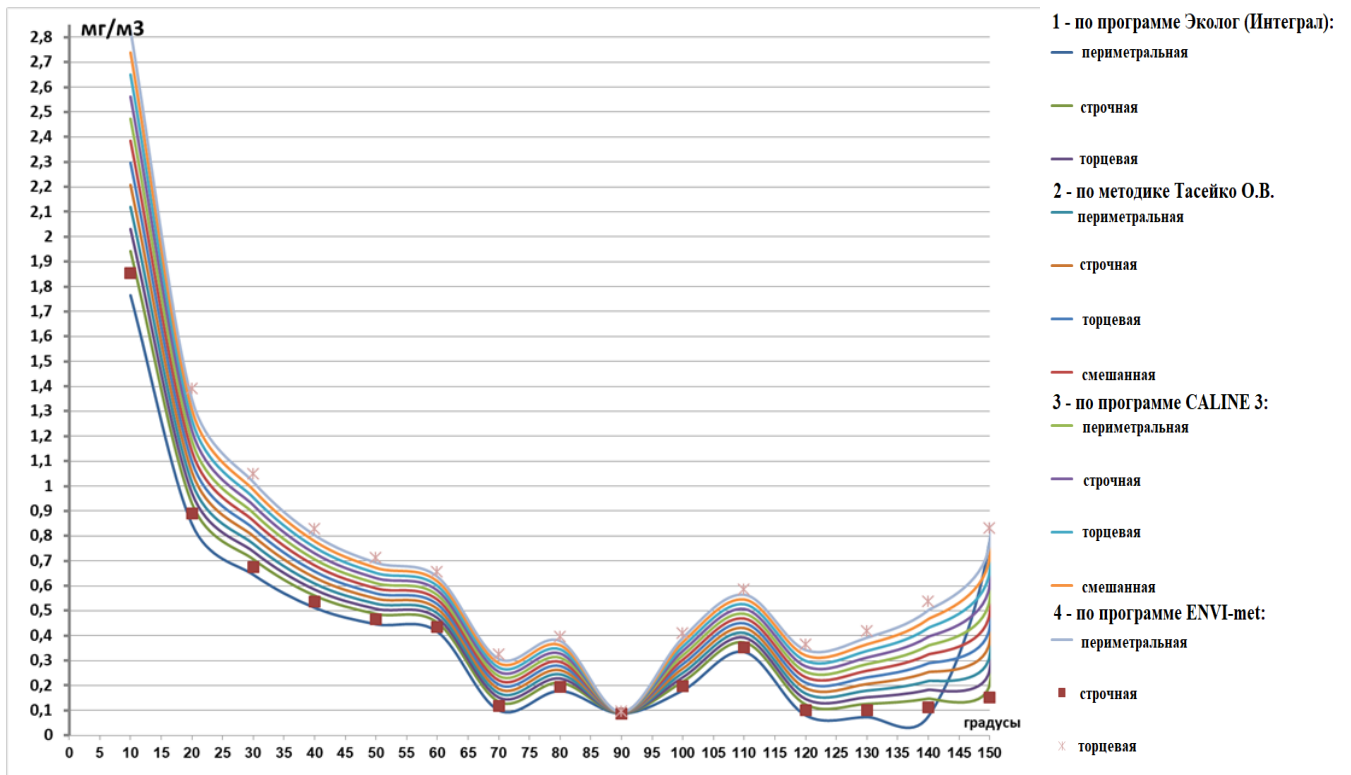


Рис.5. Распределение концентрации оксида углерода (II) в приточном воздухе при различных направлениях ветра к застройке

Таблица 6 – Сравнение с методиками расчёта рассеивания загрязняющих веществ в наружном воздухе, реализованных в программных продуктах

тип локальной застройки	CA-LINE, %	ENVI-met, %	Эколог (Интеграл), %
торцевая	до 10	до 12	до 15
строчная	до 5-8	до 5	до 10
периметральная	до 11-12	до 6	до 16
смешанная	до 3	до 3	до 5

Процент разницы результатов расчёта величины концентраций загрязняющих веществ в наружном воздухе по общепринятым методикам при разных типах локальной застройки и предложенной методики вертикального распределения концентраций загрязнителей в приточном воздухе составляет от 5-15% (табл.6).

Третья глава «Экспериментальные исследования влияния вертикального распределения концентраций загрязнителей в приточном воздухе на качество и параметры воздушной среды в здании» посвящена многолетним экспериментальным исследованиям влияния загрязнения наружного воздуха по высоте здания на качество приточного воздуха, экспериментальным исследованиям влияния температуры, скорости ветра, относительной влажности наружного воздуха на концентрацию загрязнителей внутри и снаружи зданий по высоте, построению эмпирических зависимостей концентраций загрязняющих веществ в зданиях от температурно-влажностных, скоростных параметров наружного воздуха.

По результатам экспериментальных данных установлена степень влияния вертикального распределения концентраций загрязнителей в наружном воздухе на качество воздуха в зданиях: в режиме проветривания в воздушной среде внутри здания концентрация загрязнителей достигает до 80-88,5% от концентрации в наружном воздухе, при закрытых

оконных проемах от 15-38% (от точечных источников) и от 21,2-46,2% (от передвижных источников).

Проведены экспериментальные исследования влияния скорости движения и относительной влажности атмосферного воздуха на концентрацию загрязнителей внутри и снаружи здания. Получены эмпирические зависимости концентраций загрязнителей от скорости ветра атмосферного воздуха, относительной влажности (рис.6), уравнения многофакторной регрессии (19)-(22) взаимосвязи концентраций загрязняющих веществ внутри помещений от метеорологических факторов и качества наружного воздуха.

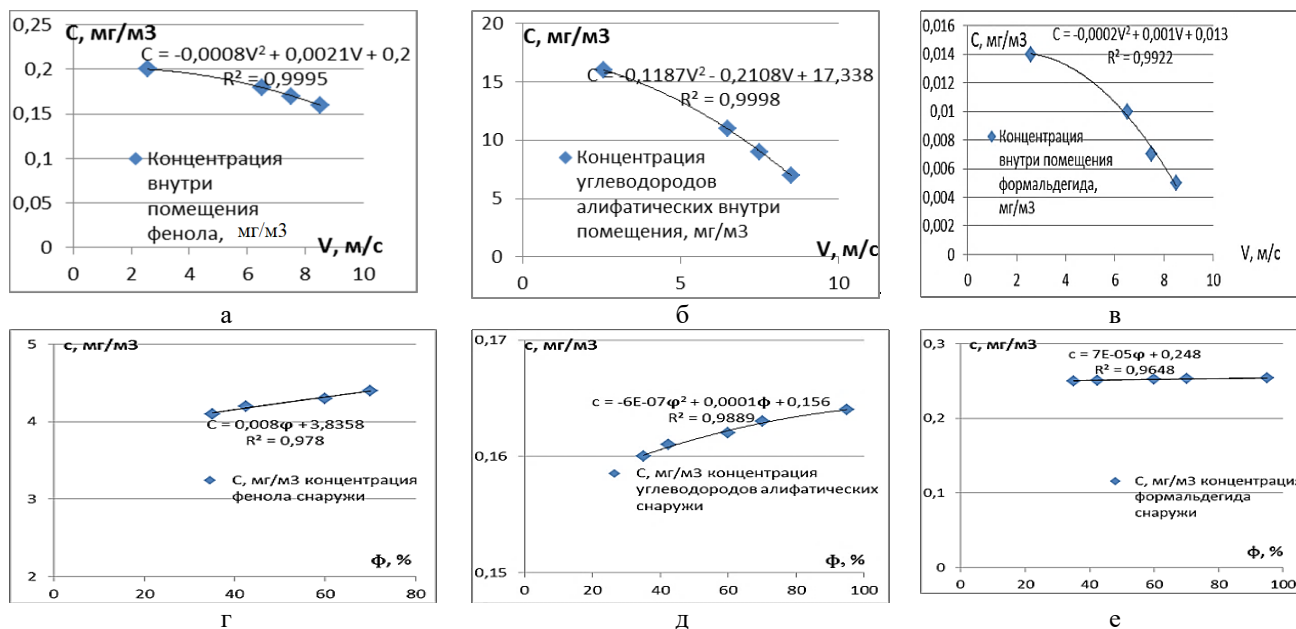


Рис. 6. Эмпирические зависимости концентраций загрязнителей (С) внутри и снаружи зданий от скорости движения (V) а-в и относительной влажности наружного воздуха (φ) г-е

По эмпирическим зависимостям можно спрогнозировать концентрацию загрязнителей внутри здания при различной скорости ветра и влажности атмосферного воздуха (рис.6). С повышением скорости движения воздуха от 6-8 м/с концентрации газообразных загрязнителей снаружи и внутри зданий уменьшаются на 20-26% по высоте здания в связи с их рассеиванием и возрастанием турбулентного перемешивания слоев в атмосферном воздухе. При увеличении относительной влажности наружного воздуха от 30-70% концентрации загрязнителей снаружи здания практически не изменяется, газообразные загрязнители не вступают в химическое взаимодействие с атмосферной влагой в тёплый и холодный периоды года (рис.6).

Зависимости концентраций загрязняющих веществ внутри помещений от температуры, влажности, скорости движения и качества наружного воздуха. Теоретически и экспериментально получены уравнения (19)-(22) взаимосвязи концентраций газообразных загрязнителей внутри помещений $C_{вн}$ от их концентраций $\frac{C_i}{C_{max}}$, температуры ($^{\circ}C$), скорости движения (м/с) и относительной влажности (%) в наружном воздухе:

- оксида углерода (II):

$$C_{вн} = 0,89 \cdot \left(\frac{C_i}{C_{max}} \right) \cdot [2,136 + 0,028 \cdot T - 0,282 \cdot V], \quad (19)$$

- углеводородов алифатических (C1-C5):

$$C_{вн} = 1,89 \cdot \left(\frac{C_i}{C_{max}} \right) \cdot [38,445 + 0,091 \cdot T - 0,029 \cdot V - 0,001 \cdot \varphi], \quad (20)$$

- фенола:

$$C_{вн} = 0,083 \cdot \left(\frac{C_i}{C_{max}} \right) \cdot [1,306 + 0,004 \cdot T - 0,016 \cdot V - 0,001 \cdot \varphi], \quad (21)$$

- формальдегида:

$$C_{\text{вн}} = 0,275 \cdot \left(\frac{c_i}{c_{\text{max}}} \right) \cdot [0,174 + 0,006 \cdot T - 0,004V - 0,001 \cdot \varphi], \quad (22)$$

где $C_{\text{вн}}$ – концентрация газообразного загрязнителя внутри здания, $\text{мг}/\text{м}^3$; T – температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; V – скорость движения наружного воздуха, $\text{м}/\text{с}$; φ – относительная влажность наружного воздуха, %; $\frac{c_i}{c_{\text{max}}}$ – отношение концентрации загрязнителя к его максимальной концентрации по высоте здания в наружном воздухе, рассчитанное по формулам (7), (14)-(15).

Наибольшее влияние на результат $C_{\text{вн}}$ оказывает температура T , скорость наружного воздуха V . Переменная φ в формуле (19) не является значимой, так как $|t| < t(0,05; 46)$, все остальные – значимые $|t| > t(0,05; 46)$ (критерий Стьюдента $t(0,05; 46)=2,030$).

Полученные зависимости (19)-(22) позволяют прогнозировать концентрации загрязнителей в помещениях (в режиме проветривания) при различных метеорологических условиях (температуре, скорости движения, влажности) в зависимости от качества наружного воздуха по высоте зданий. При повышении температуры наружного воздуха с -32°C до 0 , от 0 до $+32^{\circ}\text{C}$ концентрации всех газообразных загрязнителей в помещениях увеличиваются: оксид углерода (II) – на 80-84%; фенол – на 66-67%; формальдегид – на 58,6%; углеводов алифатических (C1-C5) – на 60-61%. При уменьшении скорости воздуха от 8 до 0 $\text{м}/\text{с}$ концентрация CO увеличивается на 38 %, углеводов алифатических (C1-C5) – на 36 %, фенола – на 33,33 %, формальдегида – на 6,07 %.

В четвертой главе «Экспериментальные исследования вариантов очистки приточного воздуха от газообразных загрязнителей в зданиях» описана разработанная

конструкция приточных устройств с очисткой воздуха (клапанов) и варианты экспериментальных исследований по выбору эффективного способа очистки приточного воздуха зданий.

Для очистки приточного воздуха от газообразных примесей по высоте зданий собран опытный образец, состоящий из (рис.7): 1. воздуховода диаметром 100 мм, длиной в зависимости от толщины наружной стены; 2. осевого вентилятора производительностью от 100 до 300 $\text{м}^3/\text{ч}$ в зависимости от вариантов загрузок фильтров и площади помещения; 3. сменных фильтров, толщина слоя до 20 мм; 4. фотокаталитического фильтра из тонкой сетчатой пластины диоксида титана (TiO_2) и двух УФ-ламп 365 нм

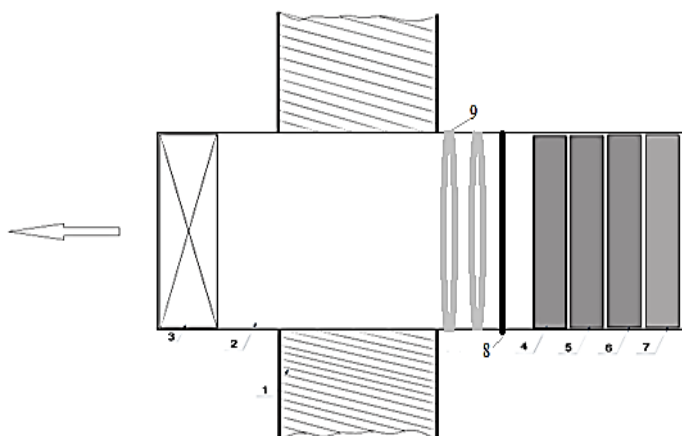


Рис.7. Устройство по очистке приточного воздуха для экспериментальных исследований: 1– наружная стена здания; 2 – воздуховод; 3 – осевой вентилятор; 4,5,6,7 – сменные фильтры с сорбентами; 8 – сетчатая пластина TiO_2 ; 9 – УФ-лампы, 365 нм, 6 Вт

(УФ-А диапазона), 6 Вт.

Конструкция приточного устройства с очисткой воздуха позволила определить эффективность очистки приточного воздуха с помощью природных сорбентов и катализатора (диоксида марганца) при разных концентрациях загрязнителей в наружном воздухе на входе в устройство. Скорость пропускания воздуха 2,6-2,7 $\text{м}/\text{с}$. Одновременно измерялись концентрации оксида углерода (II), фенола, формальдегида, углеводов алифатических на входе и на выходе из устройства по очистке воздуха. Оценивались изменяемые факторы: скорость движения воздуха, температура, относительная влажность воздуха, продолжительность действия сорбентов и катализатора, интенсивность УФ-излучения.

Для экспериментальных исследований оценки качества очистки приточного воздуха в зданиях на опытном образце устройства (рис.7) на основе метода планирования экспериментов выбраны индивидуальные сорбенты загрузок фильтров и катализатора, оказывающих

наибольшее влияние на эффективность очистки приточного воздуха, а также варианты в их сочетаниях (сорбент+катализатор, сорбент+фотокатализатор). Оценка значимости критерия проводилась по коэффициенту Стьюдента $t(0,05; 120)=1,979$.

I. Экспериментальные исследования по оценке влияния сорбентов и катализатора (диоксида марганца) на качество очистки приточного воздуха: 1 – активированный уголь; 2 – шунгит; 3 – цеолит; 4 – диоксид марганца+силикагель; 5 – шунгит+силикагель+диоксид марганца+цеолит; 6 – активированный уголь+силикагель+диоксид марганца+цеолит.

II. Экспериментальные исследования по изменению концентраций загрязнителей от продолжительности сорбции на сорбентах (шунгит, цеолит, активированный уголь, силикагель) и катализаторе (диоксид марганца): 1 – диоксид марганца; 2 – активированный уголь; 3 – шунгит; 4 – цеолит; 5 – силикагель; 6 – диоксид марганца+силикагель; 7 – шунгит+силикагель+диоксид марганца+цеолит; 8 – активированный уголь+силикагель+диоксид марганца+цеолит. Данные варианты позволили установить срок службы сорбентов и катализатора в сорбционных и сорбционно-каталитических фильтрах.

III. Экспериментальные исследования влияния фотокаталитического окисления газообразных загрязнителей на качество очистки приточного воздуха совместно с сорбентами: 1 – фотокаталитический фильтр (TiO_2+1 УФ лампа 365 нм, 6 Вт); 2 – фотокаталитический фильтр (TiO_2+2 УФ лампы 365 нм), 6 Вт; 3 – шунгит+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 4 – активированный уголь+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 5 – цеолит+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 6 – шунгит+цеолит+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 7 – активированный уголь+цеолит+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 8 – шунгит+силикагель+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 9 – активированный уголь+силикагель+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 10 – цеолит+силикагель+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 11 – шунгит+цеолит+силикагель+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 12 – силикагель+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт. Недостаточная эффективность очистки (10-39%) приточного воздуха от органических веществ (фенола, формальдегида, углеводородов алифатических) в сорбционных и сорбционно-каталитических фильтрах обуславливает необходимость исследовать воздействие УФ-излучения с фотокатализатором (TiO_2).

IV. Экспериментальное исследование влияния температуры, скорости движения и влажности наружного воздуха зданий на эффективность очистки приточного воздуха: 1 – TiO_2+1 УФ лампа 365 нм, 6 Вт; 2 – TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 3 – шунгит+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 4 – активированный уголь+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 5 – цеолит+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 6 – шунгит+цеолит+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 7 – активированный уголь+цеолит+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 8 – шунгит+силикагель+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 9 – активированный уголь+силикагель+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 10 – цеолит+силикагель+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 11 – шунгит+цеолит+силикагель+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 12 – силикагель+ TiO_2+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт. Исследованы варианты в сочетаниях «сорбент+фотокатализатор».

По результатам **первого** экспериментального исследования (табл.7) по «оценке влияния сорбентов и катализатора на качество очистки приточного воздуха» высокая эффективность очистки воздуха по оксиду углерода (II) CO в теплый период года варианта «шунгит+ MnO_2 +цеолит+силикагель» – 93,75 %, «шунгит» – 96,92%. По органическим веществам эффективность очистки приточного воздуха от загрязнителей невысокая для варианта «шунгит+ MnO_2 +цеолит+силикагель»: по углеводородам алифатическим – 30,6% , по фенолу – 37,12%, по формальдегиду – 30,6%. Для сорбента «шунгит» в теплый период года низкая эффективность очистки воздуха по органическим веществам: углеводородам алифатическим – 5,89-9,36%, фенолу – 8,50-15%, формальдегиду – 3,125-14,29%. В холодный период эффективность очистки 5 варианта «шунгит+ MnO_2 +цеолит+силикагель» увеличивается за счёт того, что продолжительность сорбции газообразных веществ возрастает из-за уменьшения подвижности молекул загрязнителей: по оксиду углерода (II) – 95%, по углеводородам алифатическим – 32%; по фенолу – 39,3 %, по формальдегиду – 38,9 %. По углеводородам алифатическим (C1-C5) в

холодный период года максимальная эффективность очистки воздуха составила 60% для варианта «уголь+силикагель+MnO₂+цеолит», в теплый период года – 61,75%.

Таблица 7 – Результаты экспериментальных исследований эффективности очистки приточного воздуха на сорбционных и сорбционно-каталитических фильтрах

№ варианта исследований	Эффективность очистки приточного воздуха внутри помещения, %							
	по оксиду углерода (II)		по углеводородам алифатическим		по фенолу		по формальдегиду	
	теплый	холодный	теплый	холодный	теплый	холодный	теплый	холодный
1 – уголь	97,33	97,73	7,64	30,59	4,89	27,07	28,57	34,29
2 – шунгит	96,92	97,23	9,36	15,20	8,49	10,68	11,11	13,89
3 – цеолит	56,36	58,1	58,48	59,06	50	50,87	41,67	69,44
4 – MnO ₂ +силикагель	90,59	91,76	50	50,59	4,14	43,23	38,67	48,57
5 – шунгит+MnO ₂ +цеолит+силикагель	93,75	95	30,41	30,99	35,08	37,25	30,56	38,89
6 – уголь+силикагель+MnO ₂ +цеолит	94,74	95,79	60	61,7	39,65	41,83	45	47,78

По результатам второго «экспериментального исследования по изменению концентраций загрязнителей от продолжительности сорбции на сорбентах и катализаторе» получены эмпирические зависимости концентраций газообразных загрязнителей в приточном воздухе от продолжительности сорбции при раздельной загрузке фильтров разработанного устройства: диоксидом марганца; шунгитом; цеолитом; активированным углем. На рис. 8 представлены зависимости концентрации оксида углерода (II) от продолжительности сорбции.

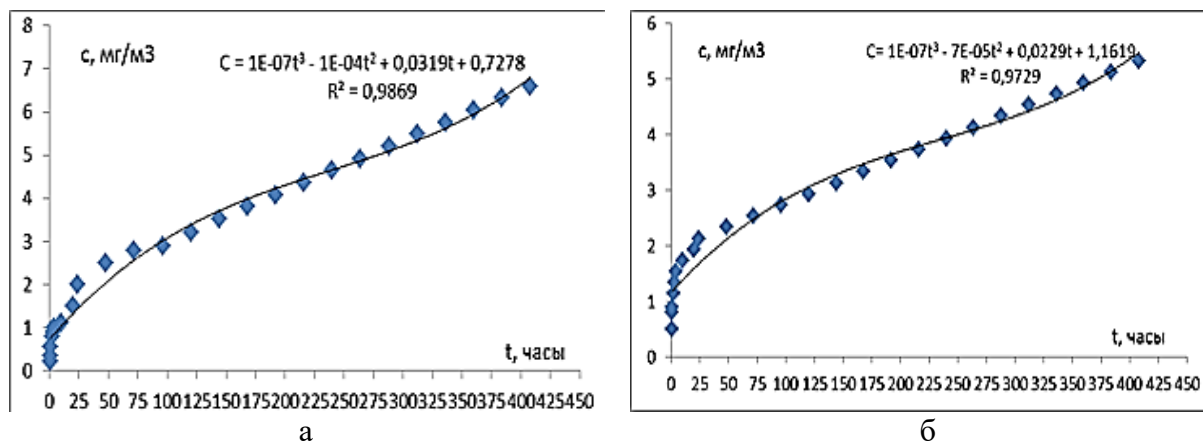


Рис. 8. Эмпирические зависимости концентрации оксида углерода (II) от продолжительности сорбции: а – «шунгит+силикагель+диоксид марганца+цеолит»; б – «активированный уголь+силикагель+диоксид марганца+цеолит»

В городских условиях для сорбентов фильтров устройства при расположении здания рядом с магистралью свыше 2000 авт./ч установлен срок службы сорбентов – 20 суток, до 1000 авт./ч – 56 дней; 500 авт./ч – 90 дней. При использовании последовательных слоев шунгита, силикагеля, диоксида марганца, цеолита эффективность очистки приточного воздуха увеличивается до 95,35% (рис.8).

Результаты третьего экспериментального исследования «влияния фотокаталитического окисления газообразных загрязнителей на качество очистки приточного воздуха с сорбентами» приведены в табл.8.

Таблица 8 – Эффективность очистки приточного воздуха от загрязнителей фотокаталитическим фильтром (УФ-А, 365 нм) с сорбентами

№ варианта исследования	Эффективность очистки приточного воздуха помещения, %							
	по оксиду углерода (II)		по углеводородам алифатическим (C1-C5)		по фенолу		по формальдегиду	
	теплый	холодный	теплый	холодный	теплый	холодный	теплый	холодный
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 - TiO ₂ +1 УФ л	16,42	22,44	28,65	27,91	25,27	26	22,22	24
	16,89	18,50	26,70	26,59	23,58	25	28,57	32,69
	13,62	22,44	24,38	20,38	18,50	20,75	20	41,51
2 - TiO ₂ +2 УФ л	38,91	38,77	38,59	36,30	38,99	38	33,33	32
	31,62	33,33	38,82	39,31	34,49	40,38	34,29	36,53
	21,04	32,653	32,50	32,72	37,74	38,30	31,25	39,62
3 – шунгит + TiO ₂ +2 УФ л	88,51	89,59	87,13	86,63	86,93	87	88,89	84,00
	88,53	88,40	87,65	87,28	86,46	86,53	86,90	88,46
	87,97	89,38	87,5	86,42	83,57	85,84	81,25	84,90
4 – уголь+ TiO ₂ +2 УФ л	48,89	53,06	29,2	41,28	32,46	34	76,39	81
	50,16	56,25	29,41	28,90	31,88	32,92	78,00	83,26
	44,4	51,02	25,00	22,00	31,58	32,18	76,56	83,96
5 – цеолит+ TiO ₂ +2 УФ л	80,20	80,20	38,59	37,21	36,82	38	52,78	62,00
	81,66	79,17	37,06	36,99	38,86	42,30	54,29	61,54
	80,84	79,59	36,88	35,80	36,84	35,85	49,22	60,37
6 – шунгит+цеолит+TiO ₂ +2УФ л	90,61	91,84	93,57	91,86	96,0	96	97,22	90
	99,88	89,58	91,18	90,17	96,51	96,34	95,71	93,26
	93,81	91,84	90	88,89	95,79	95,28	95,63	91,50
7 – уголь+цеолит + TiO ₂ +2 УФ л	87,24	87,55	77,78	77,33	86 93	87	80,56	82
	88,29	88,54	78,82	78,03	89,08	89,5	82,86	82,69
	86,53	87,76	75,33	75,93	87,37	85,84	80,46	85,28
8 – шунгит+силикагель+TiO ₂ +2УФ л	91,78	92,95	89,16	90	93,45	94,54	82,22	88,89
	92,76	93,00	90,24	90,85	99,9	100	79,07	86,98
	89,94	91,01	91,25	91,88	88,94	89,17	81,82	87,88
9 – уголь+силикагель+TiO ₂ +2 УФ л	76,97	77,97	49,40	51,20	35,59	48,69	44,44	55,56
	76,10	77,91	41,46	48,17	40,68	59,56	39,53	58,14
	72,15	72,92	41,25	46,25	30,02	42,44	21,21	42,42
10 – цеолит+силикагель+TiO ₂ +2 УФ л	83,55	85,22	62,65	63,5	53,06	55,24	82,22	88,89
	83,1	87,21	59,76	60,49	60,05	67,31	79,07	86,05
	81,69	86,59	58,75	58,63	43,57	50,34	72,73	78,79
11 – шунгит+цеолит+силикагель+TiO ₂ +2 УФ л	99,98	99,80	94,05	93,98	92,7	93,23	88,89	97,90
	99,88	99,88	95,18	95,13	100	90,10	95,35	96,51
	96,39	96,39	93,53	93,13	88,71	90,97	90,91	95,76
12 – силикагель+TiO ₂ +2 УФ л	62,40	64,76	45,78	45,78	46,51	46,51	11,11	33,33
	58,97	66,21	41,46	43,90	50,36	50,36	6,98	18,60
	58,74	71,63	38,75	41,25	41,89	41,89	9,09	15,15

По результатам исследований (табл.8) для 6 варианта «шунгит+цеолит+TiO₂+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт» и 11 варианта «шунгит+цеолит+силикагель+TiO₂+2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт» отмечена высокая эффективность очистки приточного воздуха от всех газообразных загрязнителей от 88-99,98%.

При экспериментальных исследованиях установлено, что наибольшее влияние на эффективность очистки приточного воздуха оказывает интенсивность УФ-А-излучения на расстоянии 1 см, на котором расположена УФ-лампа от пластины диоксида титана (табл.9).

По результатам обработки экспериментальных данных исследована и установлена зависимость эффективности очистки приточного воздуха (Э_i) от газообразных загрязнителей от интенсивности УФ-излучения и расстояния от ламп до пористой пластины TiO₂:

$$Э_{CO} = 12,43 + 4,30 \cdot I + 8,56 \cdot R, \quad (23)$$

$$Э_{\text{углеводороды (C1-C5)}} = 13,40 + 4,91 \cdot I + 7,62 \cdot R, \quad (24)$$

$$Э_{\text{фенол}} = 18,653 - 0,504 \cdot I + 16,076 \cdot R, \quad (25)$$

$$Э_{\text{формальдегид}} = 12,805 - 0,521 \cdot I + 16,470 \cdot R, \quad (26)$$

где I – интенсивность УФ-А излучения, Вт/м²; R – расстояние от источника УФ-излучения до

пластины диоксида титана, м.

Наибольшее влияние на результат эффективности очистки приточного воздуха оказывает расстояние от источника УФ-излучения до пластины TiO_2 R. Критерий Фишера $F_{кр}=0,78$.

Таблица 9 - Результаты контроля интенсивности УФ-излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2$) от УФ-ламп, 365 нм, 6 Вт

N, шт. УФ-ламп	R, см	УФ-излучение, $\text{Вт}/\text{м}^2$		
		УФ-А	УФ-В	УФ-С
1	5	6,3	0,053	0,56
1	5	6,4	0,055	0,59
1	3	5,07	0,044	0,111
1	3	5,05	0,082	0,55
1	1,5	4,2	0,045	0,506
1	1,5	2,09	0,017	0,099
1	1	3,8	0,034	0,406
1	1	1,08	0,016	0,094
2	5	8,6	0,072	0,68
2	5	8,2	0,073	0,67
2	3	6,55	0,054	0,222
2	3	6,45	0,053	0,275
2	1,5	5,44	0,049	0,605
2	1,5	5,43	0,050	0,606

Выявлена оптимальная интенсивность УФ-А излучения $8,6 \text{ Вт}/\text{м}^2$, 365 нм от двух УФ-ламп 6 Вт, повышающая эффективность очистки приточного воздуха свыше 90% от газообразных загрязнителей, при использовании пластины TiO_2 с послойно расположенными сорбентами шунгитом, цеолитом, силикагелем.

Результаты четвертого экспериментального исследования «влияния температуры наружного воздуха на эффективность очистки приточного воздуха» представлены на рис.9.

Результаты экспериментального исследования температуры наружного воздуха зданий в диапазоне от $+27,5$ до $-11,5^\circ\text{C}$ на эффективность очистки воздуха показали: с понижением температуры эффективность очистки почти от всех загрязнителей увеличивается в связи с тем, что подвижность молекул уменьшается, продолжительность сорбции возрастает (рис.9). Наибольшая эффективность очистки приточного воздуха при понижении температуры наружного воздуха выявлена у 6 варианта «шунгит+цеолит+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт» и 11 варианта «шунгит+цеолит+силикагель+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт» от 88,7-99,9%.

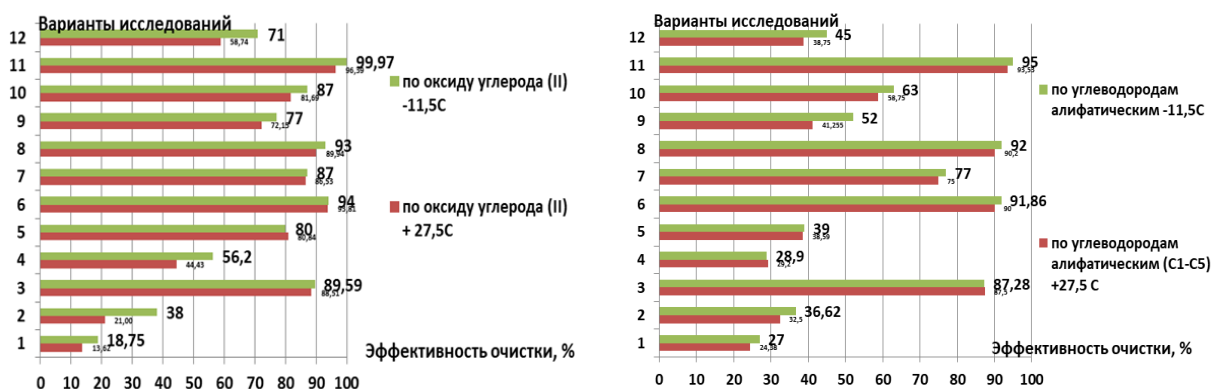


Рис.9. Результаты эффективности очистки приточного воздуха от газообразных загрязнителей при положительных и отрицательных температурах наружного воздуха: 1 – TiO_2 +1 УФ лампа 365 нм, 6 Вт; 2 – TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 3 – шунгит+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 4 – активированный уголь+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 5 – цеолит+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 6 – шунгит+цеолит+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 7 – активированный уголь+цеолит+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 8 –шунгит+силикагель+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 9 – активированный уголь+силикагель+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 10 – цеолит+ силикагель+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 11 – шунгит+цеолит+силикагель+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт; 12 – силикагель+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт

При «экспериментальном исследовании влияния скорости движения и влажности атмосферного воздуха на эффективность очистки приточного воздуха» получены эмпирические зависимости концентраций загрязнителей в помещениях от скорости ветра наружного воздуха при 11 варианте «шунгит+цеолит+силикагель+ TiO_2 +2 УФ лампы 365 нм, 6 Вт» и от относительной влажности наружного воздуха для 6 варианта «шунгит+цеолит+ TiO_2 +2 УФ-ламп». При увеличении относительной влажности наружного воздуха от 30-70% концентрации загрязнителей в помещениях уменьшаются в теплый и холодный периоды года: для CO – на 75%, углеводородов алифатических – на 80%, фенола – на 50-60%, формальдегида – на 60% (рис.10).

По данным эмпирическим зависимостям можно спрогнозировать концентрацию

загрязнителей в помещениях при эффективных способах очистки приточного воздуха и различных скоростях ветра наружного воздуха. При скорости ветра наружного воздуха выше 6-8 м/с качество очистки приточного воздуха увеличивается до 98-99%, что связано с уменьшением концентраций загрязнителей в наружном воздухе за счёт их переноса и рассеивания, необходимое время сорбции увеличивается до 120 суток.

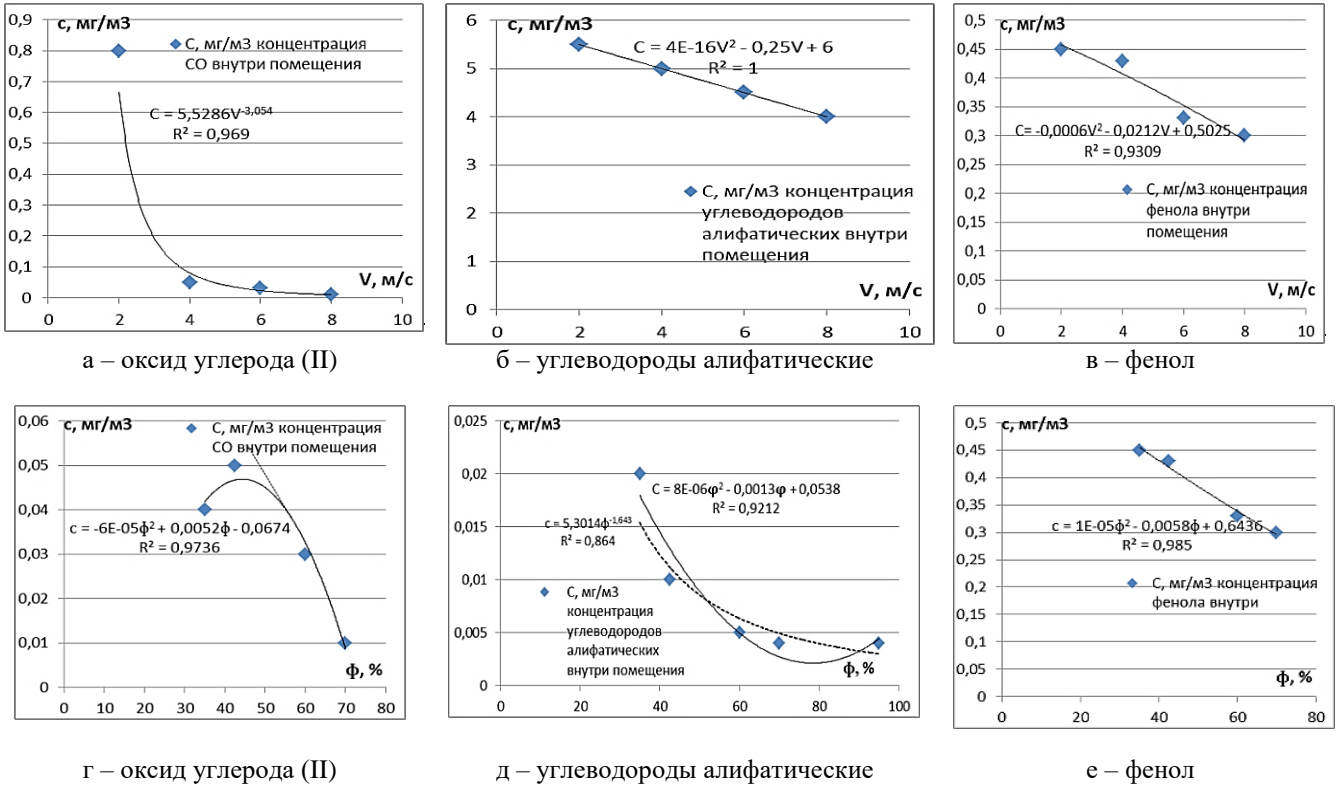


Рис.10. Эмпирические зависимости концентраций (с) загрязнителей в помещениях в зависимости от *a*-в скорости движения воздуха (V), *z*-е относительной влажности (φ) наружного воздуха

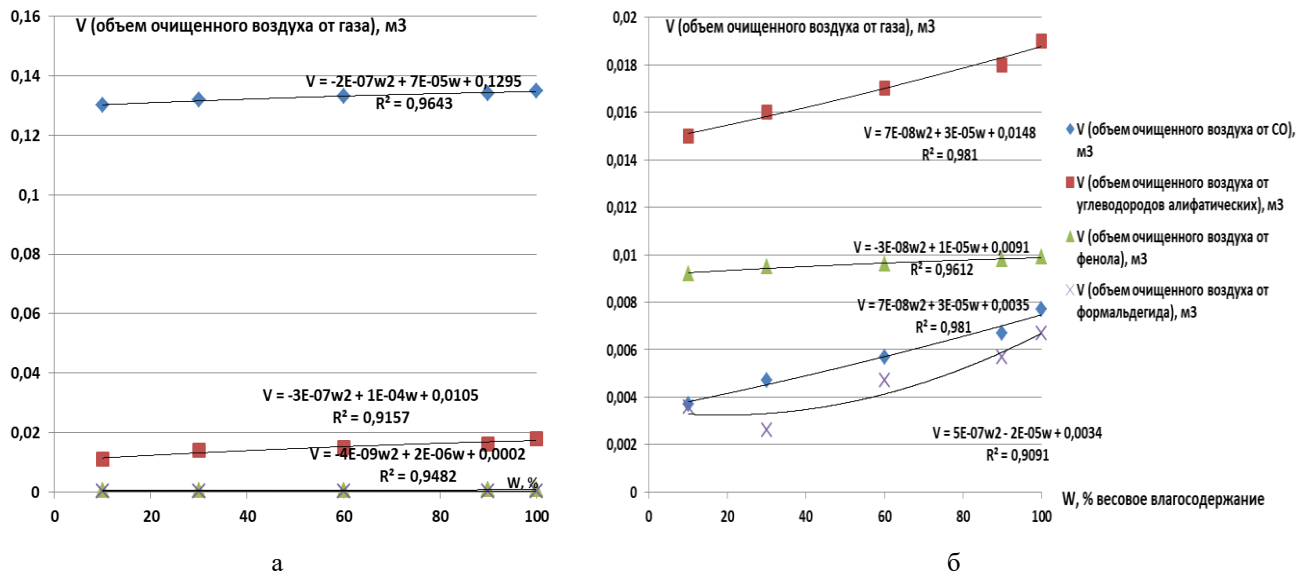


Рис. 11. Эмпирические зависимости объема очищенного воздуха (V, м³) от газообразных загрязнителей от весового влагосодержания сорбентов (W, %) в фильтрах, %: а – шунгит; б – цеолит

Получены зависимости объема очищенного воздуха, м³ от газообразных загрязнителей (по Фрейндлиху) от весового влагосодержания сорбентов (W), % для сорбции на границах раздела фаз:

активированный уголь – СО, углеводороды алифатические, фенол, формальдегид, а также на шунгите, цеолите и силикагеле. На рис. 11 приведены зависимости для шунгита и цеолита.

С ростом влагосодержания (W) сорбентов (рис.11) объем очищенного воздуха от газообразных загрязнителей увеличивается для шунгита – на 7-10%, цеолита – на 30-35%, активированного угля – на 75-80%, силикагеля – на 71% за счёт того, что при возрастании относительной влажности возможно набухание сорбента, увеличение пространства пор и адсорбционной поверхности сорбентов.

Для уточнения срока службы сорбентов экспериментально проводилось измерение сопротивления фильтров P_f шунгит, цеолит, пластина диоксида титана с течением времени с наветренной и подветренной сторон зданий (табл.10).

Таблица 10 – Коэффициент сопротивления ξ по мере загрязнения фильтров клапанов с очисткой воздуха

разность давлений, Па			экспериментальный расход приточного воздуха, м ³ /ч			коэффициент сопротивления воздуха ξ			
120 суток	90 суток	60 суток	60 суток	90 суток	120 суток	30 суток	60 суток	90 суток	120 суток
7	5	4,8	61	60	56	6,0	6,3	7,2	9,8
12	10	9,9	111	110	109	3,9	4,0	4,2	5,1
22	20	19,8	157	155	145	3,9	4,1	4,3	5,2
33	30	29,9	167	160	156	2,8	2,9	3,0	3,7
44	40	39	199	197	195	2,0	2,1	2,2	2,9
55	50	49	205	202	198	2,0	2,1	2,2	3,0
60	60	59	211	210	200	1,7	1,9	2,1	3,1
77	70	69	223	220	210	1,7	1,8	2,0	3,2
88	80	79	233	230	220	1,5	1,6	1,8	2,5
99	90	89	245	240	230	1,5	1,6	1,7	2,4
110	100	99	252	250	240	1,3	1,4	1,5	2,3
120	110	109	268	267	256	1,1	1,2	1,4	2,2

Результаты исследований установили, что по мере загрязнения фильтрующей загрузки коэффициент местного сопротивления воздуха ξ возрастает с наветренных сторон зданий, что соответствует сорбирующей способности загрузки фильтров для зданий вблизи с магистралью свыше 2000 авт./ч – с наветренной стороны 30 суток, с подветренной 40 суток; от 500-1000 авт./ч – с наветренной стороны 56 дней; с подветренной 100 суток; до 500 авт./ч – 90 дней с наветренной стороны, 120 дней с подветренной стороны.

По мере загрязнения сорбентов фильтров (табл.10) коэффициент сопротивления воздуха ξ увеличивается с 30 суток на 90-120 сутки в 1,3 раза, разница давлений более 2 Па на 90-120 сутки (3-4 месяца).

В пятой главе «Разработка методов расчёта параметров клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха и способов снижения концентраций газообразных загрязнителей в приточном воздухе зданий» разработана и описана конструкция устройства клапанов приточной принудительной вентиляции с очисткой воздуха, экспериментально и теоретически обоснованы параметры конструкции, технические характеристики загрузок фильтров. Разработан способ очистки приточного воздуха помещений от газообразных загрязнителей для зданий, находящихся в условиях высокой загрязнённости атмосферного воздуха (патент на изобретение № 2 744 623). Теоретически и экспериментально обоснован метод расчёта параметров клапанов, позволяющий определить массу сорбентов, высоту (толщину) их слоев в зависимости от продолжительности сорбции, расхода воздуха, физико-химических свойств сорбентов, концентраций загрязнителей в наружном воздухе. Проведено

моделирование процесса сорбции газов на сорбентах при различной температуре наружного воздуха.

На рис. 12, а изображен вертикальный разрез А-А устройства (клапана) с очисткой воздуха. На рис.12, б изображен вид сверху. Клапан с очисткой приточного воздуха состоит из пластиковой трубы 1 (ПВХ-труба) с наружным диаметром 100 мм и длиной до 1000 мм,

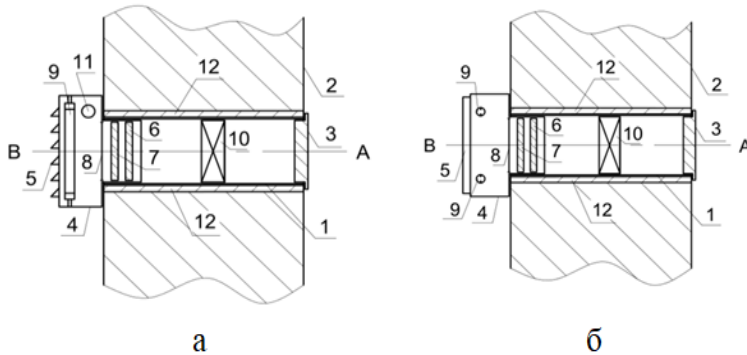


Рис. 12. Клапан приточной принудительной вентиляции с очисткой воздуха: а – вертикальный разрез А-А; б – вид сверху; 1 – пластиковая труба; 2 – наружная стена; 3 – решетка с сеткой; 4 – пластиковый оголовок прямоугольной формы; 5 – щели; 6 – фильтр с сорбционной загрузкой шунгитом (фракции 1 мм); 7 – фильтр с сорбционной загрузкой цеолитом (фракции 1-3 мм); 8 – тонкая пористая пластина диоксида титана (TiO_2); 9 – две ультрафиолетовые лампы с длиной волны 365 нм (УФ-А диапазона), мощностью 6 Вт каждая; 10 – электровентилятор; 11 – регулятор оборотов с выключателем; 12 – фольгированный изолон

расположена внутри помещения, устанавливается пластиковый оголовок 4 прямоугольной формы размером 200 на 200 мм с щелями 5 для равномерного проникновения воздуха во внутрь помещения. Воздух поступающий в помещение очищается в следующей последовательности со стороны А пластиковой трубы 1 (рис. 12, а), в соответствии с последовательно расположенными фильтрами внутри пластикового оголовка 4 прямоугольной формы с щелями 5: первый фильтр с сорбционной загрузкой шунгитом 6 (фракции 1 мм), толщина слоя сорбента 20 мм; второй фильтр 7 с сорбционной загрузкой цеолитом (фракции 1-3 мм), толщина слоя сорбента 20 мм; третий - фотокаталитический фильтр, состоящий из тонкой пористой пластины 8 диоксида титана (TiO_2), выступающей в роли катализатора и двух ультрафиолетовых ламп 9 с длиной волны 365 нм (УФ-А диапазона), 6 Вт каждая, расположенных вертикально в ряд (рис. 12, б).

Для нагнетания наружного воздуха с улицы в середине пластиковой трубы 1 расположен осевой электрический вентилятор 10. Включение осевого электрического вентилятора 10 осуществляется с помощью регулятора оборотов с выключателем 11 (дополнительно встроен программатор), расположенного на торце пластикового оголовка 4.

Теоретически и экспериментально обоснованы технические параметры устройств (клапанов) с очисткой воздуха: оптимальная скорость движения воздуха 2,81 м/с, расход воздуха от 55 до 300 м³/ч, необходимое время сорбции 1200 ч, толщина слоя сорбента от 7-20 мм для «шунгита» и от 6,93-20 мм для сорбента «цеолит» в зависимости от степени загрязнения наружного воздуха по высоте здания, минимальный диаметр 0,1 м.

С использованием эмпирических зависимостей (33)-(36) на основании теоретических преобразований в работе получены расчётные зависимости (37)-(45) технических параметров фильтров клапанов круглого сечения от расхода воздуха, плотности сорбентов и необходимого времени сорбции загрязняющих веществ.

Порядок расчёта параметров клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха:

1. Выбирается тип сорбента (шунгит, цеолит, силикагель, активированный уголь), принимаются физико-химические и технические характеристики сорбентов.

которая подрезается в зависимости от толщины наружной стены 2.

Для теплоизоляции и шумопоглощения пластиковая труба обернута фольгированным изолоном 12 толщиной 5 мм.

Пластиковая труба 1 монтируется в наружную стену здания 2. Пластиковая труба 1

после монтажа образует две стороны: А с улицы и В внутри здания. Со стороны А пластиковой трубы 1 (рис.12, а - 12, б) располагается решетка с сеткой 3, которая предотвращает попадание в воздуховод воды и снега и др. Со стороны В

пластиковой трубы 1, которая расположена внутри помещения, устанавливается пластиковый оголовок 4

2. Определяется необходимая продолжительность очистки приточного воздуха t в зависимости от концентраций загрязнителей c_0 в наружном воздухе по высоте зданий.

3. Подбирается производительность вентилятора с учетом аэродинамического сопротивления фильтров (табл.10).

4. Рассчитывается требуемая масса и толщина слоев сорбентов по полученным уравнениям (38)-(45) в зависимости от необходимой продолжительности очистки воздуха t .

В качестве исходных уравнений выбраны (28)-(29) высота слоя и количество адсорбента фильтров:

$$G = \frac{Q \cdot t \cdot c_0}{X_2 - X_1}, \quad (27)$$

где Q – расход воздуха, м³/ч; t – продолжительность сорбции, ч; c_0 – начальная концентрация загрязнителя, мг/м³; X_2 – динамическая активность сорбента по i -газу, % масс.; X_1 – остаточная активность после десорбции, % масс.

Высота слоя сорбента, м:

$$H = \frac{G}{0,785 D^2 \rho'}, \quad (28)$$

где G – масса сорбента, необходимая для сорбции на поверхности газ-твердое вещество, кг; D – диаметр приточного клапана, м; ρ – плотность сорбента, кг/м³.

Количество адсорбента выражено из формулы (29):

$$G = (0,785 \cdot D^2 \rho) H \quad (29)$$

Подставлено G из (27) в формулу (29) :

$$(0,785 \cdot D^2 \rho) H = \frac{Q \cdot t \cdot c_0}{X_2 - X_1} \quad (30)$$

Выражена высота слоя сорбента из выражения (30):

$$H = \frac{Q \cdot t \cdot c_0}{(X_2 - X_1) \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \rho'} \quad (31)$$

где Q – расход воздуха, м³/ч; t – продолжительность сорбции, ч; c_0 – начальная концентрация загрязнителя, мг/м³; X_2 – динамическая активность сорбента по i -газу, % масс.; X_1 – остаточная активность после десорбции, % масс; ρ – плотность сорбента, кг/м³.

Использовано $c_0(t)$ по эмпирической зависимости (33) и подставлено в формулу (32), аналитически получена для сорбента шунгита толщина слоя загрузки в фильтре, м:

$$H = \frac{1,733 \cdot Q \cdot t \cdot e^{0,003t}}{(X_2 - X_1) \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \rho'} \quad (32)$$

где Q – расход воздуха, м³/ч; t – продолжительность сорбции, ч; X_2 – динамическая активность сорбента по i -газу, % масс.; X_1 – остаточная активность после десорбции, % масс; ρ – плотность сорбирующего вещества, кг/м³.

По результатам экспериментальных исследований использованы эмпирические зависимости начальной концентрации загрязнителя c_0 от времени (t) очистки воздуха в клапанах приточной вентиляции для:

-шунгита: $c_0 = 1,733 \cdot e^{0,003t}, \quad (33)$

-цеолита: $c_0 = 0,022t^2 + 3,681t + 6,065, \quad (34)$

-активированного угля: $c_0 = 0,051 \cdot t + 4,447, \quad (35)$

-силикагеля: $c_0 = 0,312t - 0,578, \quad (36)$

где t – продолжительность сорбции, ч.

Толщина загрузки фильтра приточного устройства представлена как дифференциальное уравнение (37):

$$H'(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{Q \cdot t \cdot 1,733 \cdot e^{0,003t}}{(X_2 - X_1) \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \rho'} \right) \quad (37)$$

После необходимых преобразований получена зависимость для расчёта необходимой толщины загрузки фильтра приточного устройства для шунгита (38):

$$H'(t) = \frac{1,733 \cdot Q}{(X_2 - X_1) \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \rho'} \cdot (e^{0,003t} + t \cdot 0,003 \cdot e^{0,003t}), \quad (38)$$

- цеолита:

$$H'(t) = \frac{Q}{(X_2 - X_1) \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \rho} \cdot (0,065 \cdot t^2 + 7,363 \cdot t + 6,065), \quad (39)$$

- силикагеля:

$$H'(t) = \frac{Q}{(X_2 - X_1) \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \rho} \cdot (0,6234 \cdot t - 0,578), \quad (40)$$

- активированного угля:

$$H'(t) = \frac{Q}{(X_2 - X_1) \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \rho} \cdot (0,102 \cdot t + 4,447), \quad (41)$$

где Q – расход воздуха, м³/ч; t – продолжительность сорбции, ч; X_2 – динамическая активность сорбента по i -газу, % масс.; X_1 – остаточная активность после десорбции, % масс; ρ – плотность сорбирующего вещества, кг/м³.

Необходимая масса (мг) для загрузки фильтра (шунгита) в зависимости от времени:

$$G(t) = \frac{1,733 \cdot Q}{(X_2 - X_1)} \cdot (e^{0,003t} + 0,003 \cdot t \cdot e^{0,003t}), \quad (42)$$

- для цеолита:

$$G(t) = \frac{Q}{(X_2 - X_1)} \cdot (0,065 \cdot t^2 + 7,363 \cdot t + 6,065), \quad (43)$$

- силикагеля:

$$G(t) = \frac{Q}{(X_2 - X_1)} \cdot (0,6234 \cdot t - 0,578), \quad (44)$$

- активированного угля:

$$G(t) = \frac{Q}{(X_2 - X_1)} \cdot (0,102 \cdot t + 4,447), \quad (45)$$

где Q – расход газа, м³/ч; t – продолжительность сорбции, ч; X_2 – динамическая активность сорбента по i -газу, % масс.; X_1 – остаточная активность после десорбции, % масс.

5. Определяется диаметр приточных клапанов по полученной формуле (46) в зависимости от расхода воздуха Q , технических и физико-химических характеристик загрузок последовательных фильтров:

$$D = \sqrt{\frac{0,103 \cdot Q \cdot (X_2 - X_1) \cdot \rho}{H} \cdot (0,065 \cdot t^2 + 7,363t + 6,065)}, \quad (46)$$

где Q – расход воздуха, м³/ч; t – продолжительность сорбции, ч; X_2 – динамическая активность сорбента по i -газу, % масс.; X_1 – остаточная активность после десорбции, % масс; ρ – плотность сорбента, кг/м³; H – высота слоя сорбентов, м.

6. Определяется расход приточного воздуха (47)-(50) с учётом толщины и массы сорбентов фильтров, диаметра приточного устройства:

- шунгит:

$$Q(t) = \frac{(X_2 - X_1) \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \rho \cdot H}{1,733 \cdot (e^{0,003t} + t \cdot 0,003 \cdot e^{0,003t})}, \quad (47)$$

-цеолит:

$$Q(t) = \frac{(X_2 - X_1) \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \rho \cdot H}{(0,065 \cdot t^2 + 7,363t + 6,065)}, \quad (48)$$

-силикагель:

$$Q(t) = \frac{(X_2 - X_1) \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \rho \cdot H}{(0,623t - 0,578)}, \quad (49)$$

- активированный уголь:

$$Q(t) = \frac{(X_2 - X_1) \cdot 0,785 \cdot D^2 \cdot \rho \cdot H}{(0,102t + 4,447)}, \quad (50)$$

где t – продолжительность сорбции, ч; X_2 – динамическая активность сорбента по i -газу, % масс.; X_1 – остаточная активность после десорбции, % масс; ρ – плотность сорбирующего вещества, кг/м³; D – диаметр приточного клапана, м.

В разделе «Моделирование процесса сорбции газов на сорбентах в фильтрах клапанов при различной температуре» построены изотермы адсорбции Фрейндлиха газов на поверхности твердое вещество-газ при диапазоне температур: от -32 °С до 0 °С и 0 °С от +32 °С.

На рис.13, а - рис.13, е представлены изотермы сорбции газов (оксида углерода (II), фенола, формальдегида) на поверхностях сорбентов шунгит, цеолит.

Построенные изотермы показали, что с уменьшением температуры наружного воздуха в

диапазоне от $+32^{\circ}\text{C}$ до -32°C , процесс сорбции идет медленнее и предел адсорбции (Γ , кг/кг) становится выше за счёт того, что подвижность молекул загрязнителей в холодный период года уменьшается (рис.13).

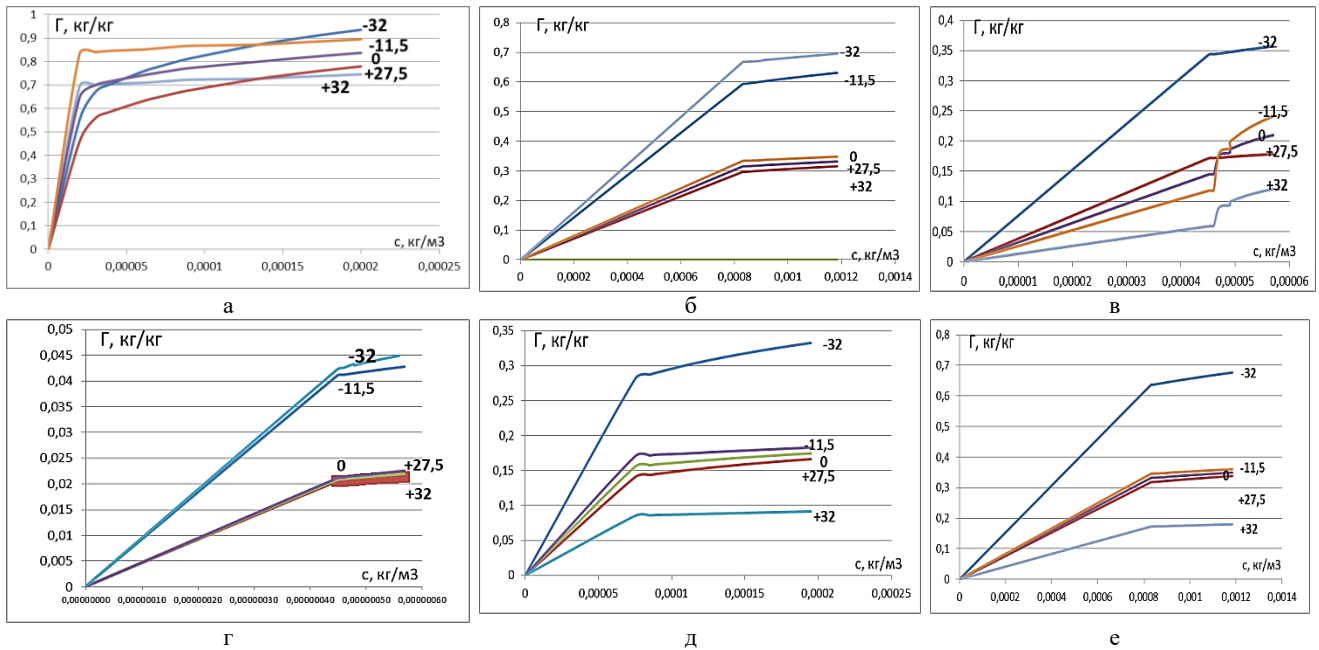


Рис. 13. Изотермы адсорбции газов на поверхности сорбентов в фильтрах при температурах наружного воздуха: -32°C ; $-11,5^{\circ}\text{C}$; 0°C ; $+27,5^{\circ}\text{C}$; $+32^{\circ}\text{C}$: а – оксид углерода (II)-шунгит; б – углеводороды алифатические (C1-C5)-шунгит; в – фенол-шунгит; г – формальдегид-шунгит; д – оксид углерода (II)-цеолит; е – углеводороды алифатические-цеолит

При понижении температуры наружного воздуха предел адсорбции (Γ) возрастает: на шунгите для оксида углерода (II) CO от 0,695-0,935 кг/кг; углеводородов алифатических от 0,315-0,695 кг/кг, формальдегида от 0,022-0,045 кг/кг, фенола от 0,111-0,351 кг/кг. На сорбенте цеолите (рис.13) предел адсорбции по CO увеличился от 0,090-0,340 кг/кг; по углеводородам алифатическим от 0,199-0,690 кг/кг; для фенола от 0,271-0,788 кг/кг; для формальдегида от 0,0048-0,014 кг/кг. На поверхности цеолита сорбция всех загрязнителей протекает медленнее, особенно для оксида углерода (II) в 4,8 раза.

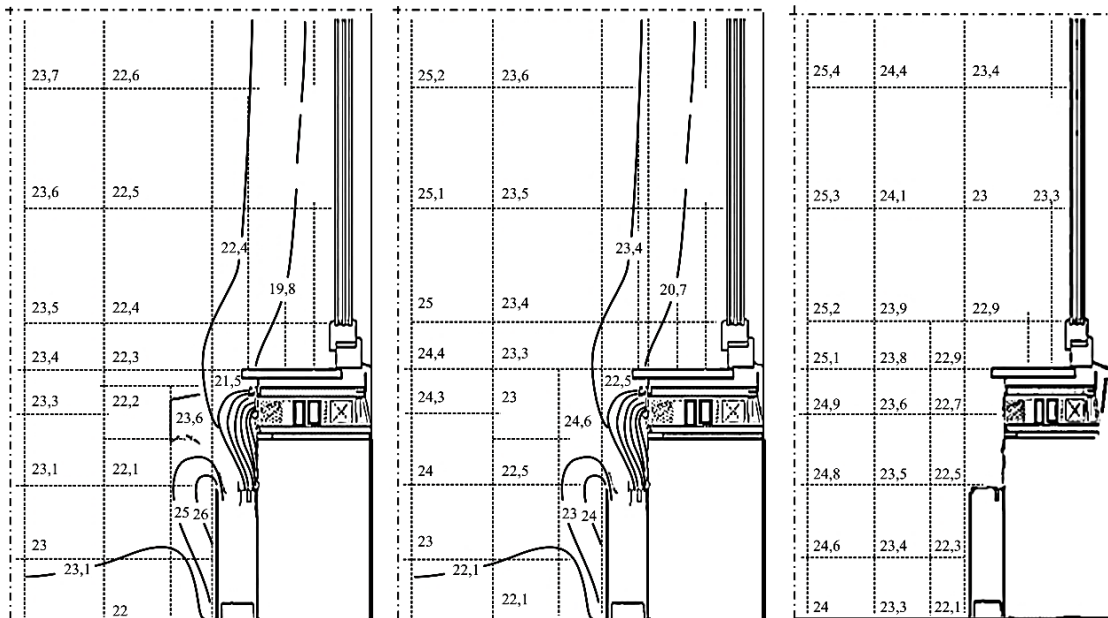
Для установления закономерности влияния очередности послойного расположения сорбентов (шунгита, цеолита, силикагеля) и их соотношения масс при наличии катализатора (диоксида марганца) разработан способ очистки от газообразных загрязнителей приточного воздуха помещений зданий от наружных источников выброса (патент на изобретение №2 747 623, 06.11.2020 г.). Выбранный катализатор не требуется предварительно разогревать. Способ очистки приточного воздуха отличается тем, что загрязненный воздух последовательно пропускают сначала через слой сорбента шунгита, слой сорбента силикагеля, затем через слой катализатора на основе диоксида марганца, далее через слой сорбента – цеолита в соотношении масс 0,5:0,6:1:0,8 соответственно, определенного фракционного состава, без перемешивания их масс: первый сорбент – шунгит Зажогинского месторождения, фракциями 1 мм, насыпной плотностью 1800 кг/м³, толщиной слоя 20,45 мм; второй сорбент – силикагель технический КСКГ, 2,8 мм, 760 кг/м³ 21,55 мм, третий слой катализатора на основе диоксида марганца, 0,7-1 мм, 1400 кг/м³, 20 мм; четвертый сорбент – цеолит Холинского месторождения, 1-3 мм, 1020 кг/м³, 20,45 мм, скорость пропускания воздуха 2,6-2,7 м/с. В теплый период года эффективность очистки приточного воздуха помещений от газообразных загрязнителей данного способа: по оксиду углерода (II) – 93,75% (в холодный – 95%), по углеводородам алифатическим (C1-C5) – 80,59% (в холодный – 84,78%), по фенолу – 79,84% (в холодный – 80,84%), по формальдегиду – 71,88% (в холодный – 75,89%).

Шестая глава «Практическая реализация рекомендаций по повышению качества очистки приточного воздуха помещений при проектировании зданий». Описывается

внедрение способа очистки приточного воздуха, конструкции устройств с очисткой воздуха (клапанов) в многоэтажное строительство зданий с разработанным программным обеспечением, технико-экономическое обоснование улучшения качества приточного воздуха в зданиях. Приведены результаты опытных испытаний температурно-влажностного режимов, скоростного режима в помещениях при работе приточных клапанов с очисткой воздуха. Разработаны программы для ЭВМ: сводного расчёта вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей по высоте зданий с учетом типа локальной застройки, расчёта технических характеристик загрузок фильтров при различном расходе воздуха, концентраций загрязнителей в приточном воздухе по высоте зданий от точечных и передвижных источников, концентраций загрязнителей в многоэтажных зданиях по времени суток от автотранспорта.

Для реализации результатов исследований проведена очистка приточного воздуха в помещениях проектируемых зданий. Для проведения начальных испытаний устройство смонтировано в наружной стене помещения объемом 120-130 м³ на 1 этаже здания. Клапаны с очисткой воздуха монтировались над радиаторами отопления. В процессе эксперимента снаружи и внутри помещения измерялись концентрации оксида углерода (II), фенола, формальдегида, углеводородов алифатических (C1-C5), фиксировались значения скорости движения, температуры, влажности воздушной среды в теплый и холодный периоды года.

Экспериментальные исследования температурного режима помещений проводились при температурах наружного воздуха: -32; -11; 5; 0; +11,5; +27,5 °С в течение двух часов работы клапана приточной вентиляции с очисткой воздуха. В холодный период года температура поверхности отопительного прибора изменялась от +70 до +95 °С в зависимости от температуры наружного воздуха. Струя приточного воздуха смешивается с внутренним, в помещении температура повышается от +21,5 до +25,2 °С, скорость движения воздуха в струе уменьшается до 0,11-0,12 м/с. В холодный период через 5 мин после открытия клапана температура воздуха на высоте 0,1 м в нижней зоне помещения понижается в среднем на 1,3-1,7 °С и принимает стабильное допустимое значение после 15-20 минут.



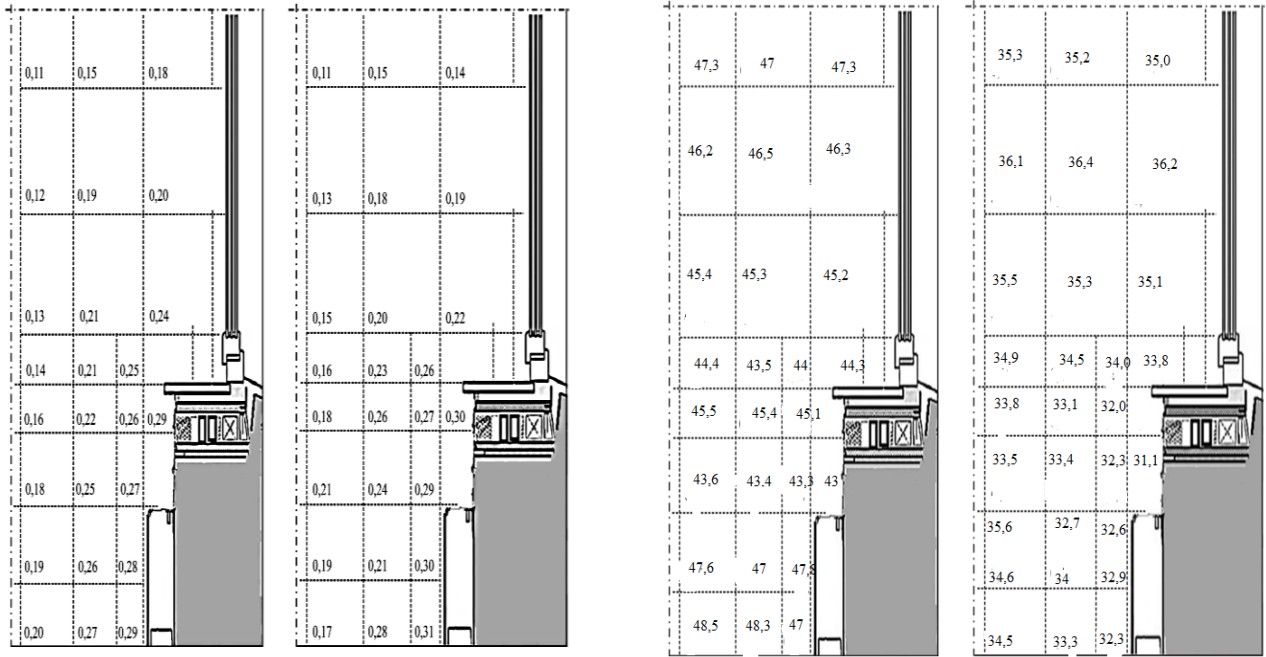
$t_{н} = -32^{\circ}\text{C}$, $t_{в} = +22,1^{\circ}\text{C}$, $55 \text{ м}^3/\text{ч}$

$t_{н} = -27,5^{\circ}\text{C}$, $t_{в} = +23,6^{\circ}\text{C}$, $65 \text{ м}^3/\text{ч}$

$t_{н} = +27,5^{\circ}\text{C}$, $t_{в} = +22,7^{\circ}\text{C}$, $120 \text{ м}^3/\text{ч}$

Рис. 14. Поля температур помещений в холодный и тёплый периоды года при работе клапанов после 15 минут

Поля температур, поля скоростей движения воздуха экспериментально измерялись по высоте и длине помещений с шагом 0,1 м. Температура воздуха на высоте 0,1; 0,5; 1,5; 1,7 м принимает стабильное значение после 15 минут и находится в пределах допустимых значений на расстояниях 0,5 м и далее от наружной стены помещения (рис.14).

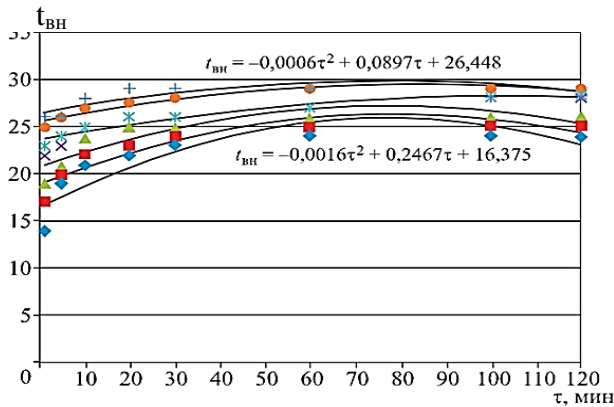


а) $t_n = -32^{\circ}\text{C}$, $V_n = 0,21 \text{ м/с}$ $t_n = +27,5^{\circ}\text{C}$, $V_n = 0,22 \text{ м/с}$, $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ б) $t_n = +27,5^{\circ}\text{C}$, $\varphi_n = 48 \%$ $t_n = -32^{\circ}\text{C}$, $\varphi_n = 33 \%$, $55 \text{ м}^3/\text{ч}$

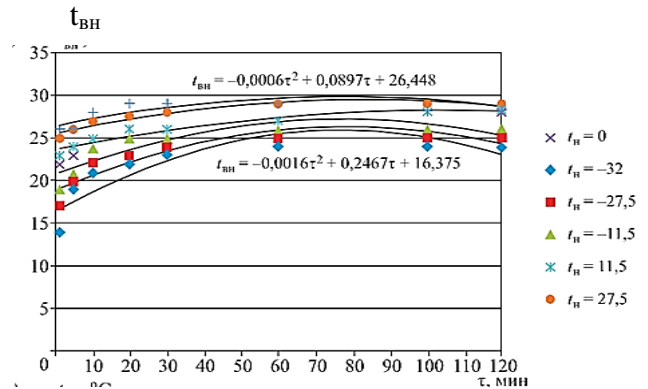
Рис. 15. Поля скоростей движения воздуха (а) и поля относительной влажности (б) в холодный и тёплый периоды года при работе клапанов с очисткой воздуха после 15 минут

Поля скоростей движения воздуха на всех высотах (рис.15, а) находятся в пределах допустимых значений в теплый и холодный периоды года, так как за счет аэродинамического сопротивления в фильтрах клапанов скорость движения воздушного потока на выходе у воздухораспределителя не более 0,22-0,27 м/с, в обслуживаемой зоне - не более 0,2 м/с.

Поля относительной влажности находятся в пределах допустимых норм (рис.15, б). На рис.14-15 представлен экспериментально измеренный расход приточного воздуха при опытных испытаниях.



а – на высоте 0,1 м



б – на высоте 1,7 м

Рис. 16. Результаты экспериментальных исследований изменения температурного режима ($t_{вн}$) по высоте помещения в течение времени (τ , мин)

После 20 минут работы приточного устройства на высоте 0,1 м от пола помещения при температуре наружного воздуха -32°C температура воздуха внутри помещения повышается от $+14^{\circ}\text{C}$ до $+18-23^{\circ}\text{C}$ на расстоянии 0,5 м от наружной стены при расходе приточного воздуха от $55-65 \text{ м}^3/\text{ч}$ и температуре поверхности отопительного прибора от $+75$ до $+80^{\circ}\text{C}$ за счет смешивания конвективной неизотермической струи приточного воздуха устройства с внутренним нагретым воздухом помещения (от радиатора отопления). На высотах 1,5 м; 1,7 м

температура повышается в течение 20 минут от $+16$ до $+23$ °С при температуре поверхности отопительных приборов $+80$ °С (рис. 16).

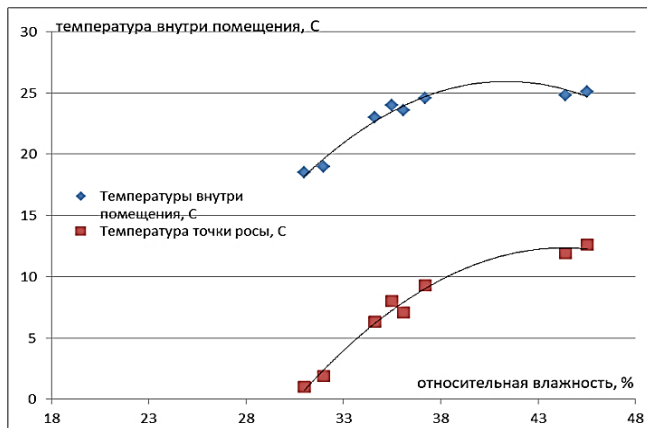


Рис.17. Температура точки росы в помещении при работе клапанов с очисткой воздуха в течение 30 минут

от пола на расстоянии 0,5 м от наружной стены температура составила $+21$ °С до стабильной температуры внутри помещения $+26-27$ °С при расходе воздуха 95 до 120 м³/ч после 15 минут работы устройства. При правильном режиме вытяжной вентиляции после 15 минут работы устройства температура и скорость движения воздуха в помещениях соответствует допустимым значениям.

Уменьшение расхода приточного воздуха на $30-19$ м³/ч за счет регулирования клапанов (встроенного программатора, таймера по времени суток, сезонов года) в зависимости от качества наружного воздуха и параметров приточного воздуха, снижает влияние приточной струи на температурный режим в помещении и приводит к повышению средней температуры воздуха на $1,6-2,5$ °С в холодный период года.

На основании расчета с помощью программного обеспечения при температуре наружного воздуха -32 °С расход воздуха изменяется от $55-65$ м³/ч, при $-27,5$ °С – от $65-75$ м³/ч, при $+11,5$ °С – от $95-100$ м³/ч, при $+27,5$ °С – от $105-120$ м³/ч. По времени суток расход приточного воздуха регулируется с помощью блока управления, встроенного в оголовок клапана приточной вентиляции, в зависимости от степени загрязнения наружного воздуха.

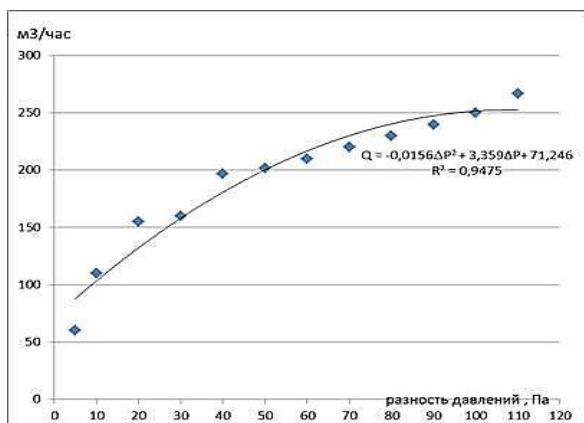


Рис. 18. Зависимость расхода воздуха клапанов от разности давлений

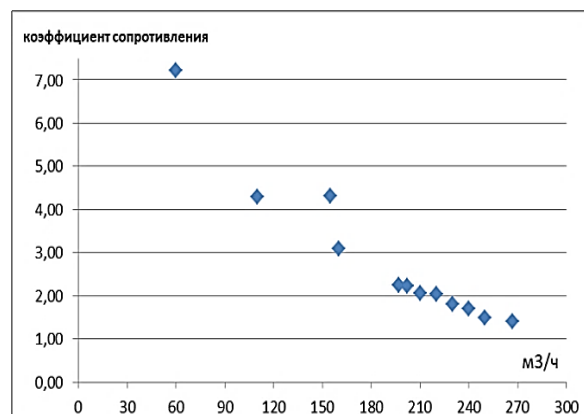


Рис. 19. Величина коэффициента сопротивления воздуха ξ в клапанах в зависимости от расхода воздуха

При опытных испытаниях аэродинамических характеристик разработанных клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха получена зависимость расхода воздуха от разности давлений (рис.18). По результатам испытаний (рис.19) получено аэродинамическое сопротивление клапанов ξ в зависимости от расхода поступающего воздуха.

Для оценки эффективности очистки приточного воздуха помещений с помощью запатентованной конструкции клапанов выбраны три варианта загрузки фильтров, позволяющие снижать концентрацию оксида углерода (II) CO , фенола $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, формальдегида CH_2O , углеводородов алифатических C_xH_y (C1-C5), содержащихся в наружном воздухе зданий от магистрали свыше 2000 авт./ч (табл.11).

Таблица 11 – Эффективность очистки приточного воздуха от загрязняющих веществ

№ варианта загрузки фильтров	Эффективность очистки приточного воздуха, %			
	CO	C_xH_y (C1-C5)	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	CH_2O
1– уголь (3 мм)+ TiO_2 +2 УФ-А лампы 365 нм	50,16	29,41	31,88	78
2 – шунгит (1 мм), цеолит (1-3 мм), TiO_2 +2 УФ-А 365 нм	99,88	91,18	96,51	95,71
3 – уголь (3 мм), цеолит (1-3 мм), TiO_2 + 2УФ-А 365 нм	88,29	78,82	89,08	82,86

По результатам исследований (табл.11) наиболее эффективный вариант 2. Применена программа для ЭВМ по расчету и обоснованию технических характеристик сорбентов. Обоснован срок службы сорбентов фильтров, необходимая их толщина слоя и масса при расходах воздуха от 55 до 300 $\text{м}^3/\text{ч}$.

Приведен алгоритм, блок-схема (фрагменты) разработанной программы с учетом типа локальной застройки (рис.20).

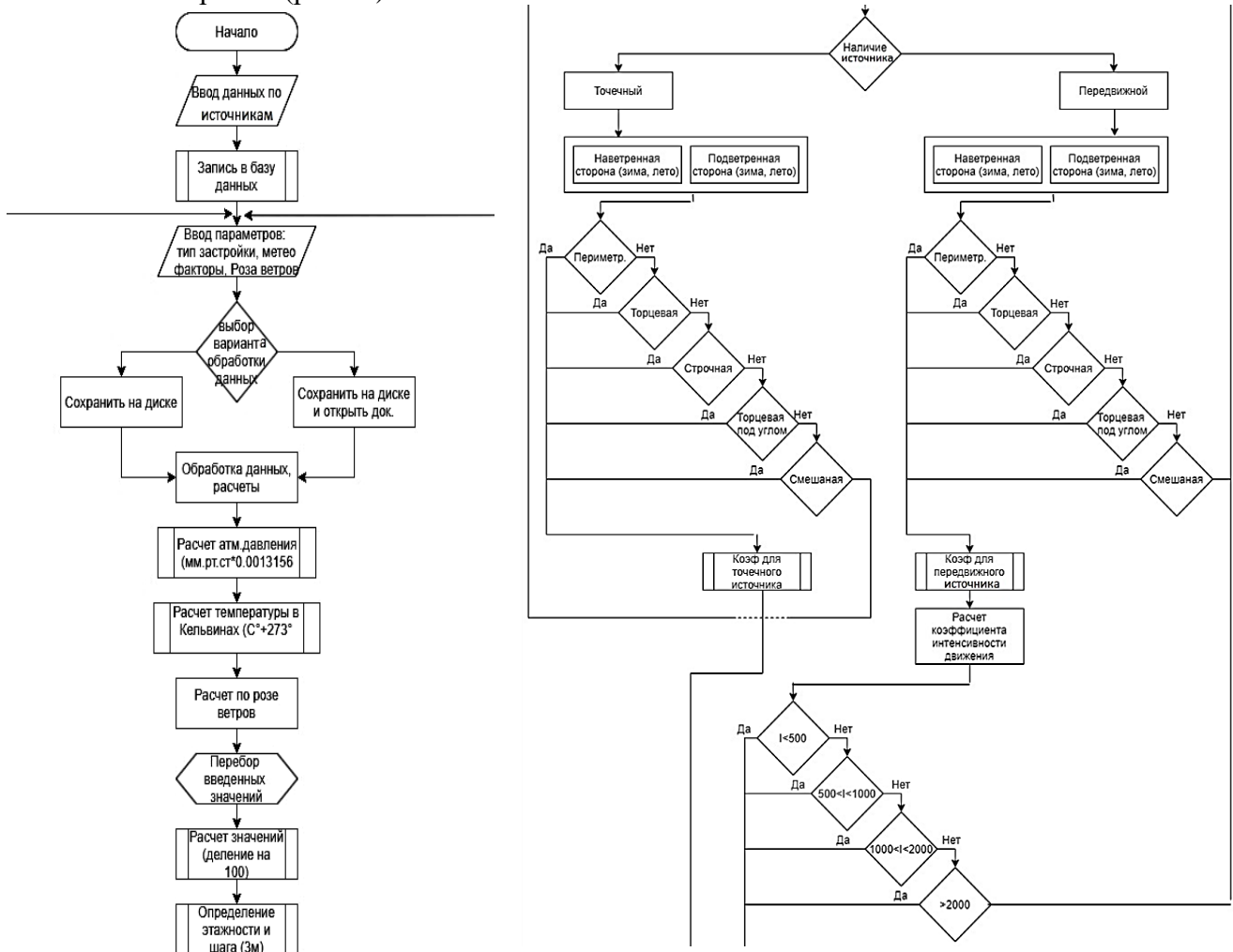


Рис.20. Блок-схема (фрагменты) алгоритма программы сводного расчёта безразмерных концентраций газообразных загрязнителей в приточном воздухе по высоте зданий с учетом типа локальной застройки

Программы для ЭВМ внедрены при проведении мониторинга вертикального распределения концентраций по высоте зданий испытательной лабораторией ФБУЗ «Центр

гигиены и эпидемиологии по Тюменской области» Роспотребнадзора, использовались и внедрены в жилищное строительство при проектировании зданий с очисткой воздуха в проектной организации ОАО «ТДСК», при строительстве административных зданий ООО «Уралмаш НГО Холдинг», ПАО «Сибур ТюменьГаз». Разработанное программное обеспечение позволило обосновать необходимость очистки приточного воздуха по высоте зданий.

Проведено технико-экономическое обоснование и расчет экономических затрат на конструкцию разработанных устройств с очисткой воздуха при внедрении в многоэтажное строительство. Срок окупаемости (5-6 месяцев) предложенной конструкции приточных устройств с очисткой воздуха и способа очистки приточного воздуха зданий связан с использованием программного обеспечения по обоснованию высоты от поверхности земли, где требуется очистка приточного воздуха, программы расчёта и обоснования технических характеристик сорбентов приточных устройств в зависимости от степени загрязнения наружного воздуха по высоте многоэтажных зданий. Общая экономическая эффективность от 414 720 до 475 630 руб. (снижение стоимости за 1 м² площади в 1,5-2,5 раза).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа позволяет предложить новое научное направление в области повышения эффективности очистки приточного воздуха помещений различного назначения с помощью приточных устройств вентиляции с забором воздуха по высоте зданий путем использования нового технического решения конструкции клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха, теоретических основ их расчёта на основе представленных методик расчёта вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей вблизи фасадов зданий с учётом типологии городской застройки по результатам теоретических и экспериментальных исследований, алгоритмов расчёта прогнозирования параметров приточного воздуха помещений в зависимости от степени загрязнения наружного воздуха по высоте зданий, внедрение которых в многоэтажное строительство вносит значительный вклад в развитие страны.

1. Использование существующих методик рассеивания газообразных загрязнителей требует учёта вертикального распределения концентраций загрязнителей по высоте здания, максимальной концентрации по высоте здания при разных типах локальной застройки, изменяющихся по величине и направлению скоростей ветра наружного воздуха по высоте здания. Способы и средства очистки приточного воздуха в малой степени обеспечивают защиту от загрязнения воздуха зданий газообразными веществами от наружных источников выброса.

2. Экспериментально и теоретически обоснована методология определения вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей с учётом типа локальной застройки при проектировании воздухозаборных устройств с очисткой приточного воздуха зданий по высоте:

- входящие параметры методик расчёта: вид источника выброса (точечный, передвижной источник), в зимний и летний периоды параметры приточного воздуха: скорость ветра, м/с; температура, К; давление, мм.рт.ст. (атм.); роза ветров, по основным румбам, %; расстояние от источника до здания R_i , м; высота здания H , м; длина здания, м; массы выбросов загрязняющих веществ, г/с (мг/ч); плотность застройки, тип локальной застройки, для точечных источников: высота источника $H_{и}$, м; отношение $H_{и}/H$; от передвижных источников: расстояние от магистрали до здания R_i , м; интенсивность движения автотранспорта, авт./ч;

- доказано, что законы распределения функции величины концентрации газообразных загрязнителей для разных уровней от поверхности земли по высоте здания от передвижных источников отличаются по времени суток, интенсивности движения магистрали, градостроительной типологии локальной застройки при различных независимых величинах метеорологических факторов;

- закономерности изменений концентраций СО зависят не только от высоты точечного источника $H_{и}$, высоты здания H , расстояния от источника до здания, но и типа локальной застройки. Экспериментальные исследования по высоте зданий показали, что при строчной

застройке концентрация загрязнителя с подветренной стороны зданий уменьшается до 31,25%, при торцевой – до 10%, при периметральной – до 20%, при торцевой под углом – до 17,86%, при смешанной – до 12,11 %;

- определены поправочные коэффициенты для расчёта концентраций газообразных загрязнителей, позволяющие учитывать тип локальной застройки от точечных и передвижных источников;

- построены поверхности изменения закономерностей концентраций газообразных загрязнителей в наружном воздухе по высоте всего здания для прогноза вертикального загрязнения приточного воздуха от точечных и передвижных источников в зависимости: от расстояния от источника до здания, высоты источника выброса, расстояния от магистрали до здания, интенсивности движения магистрали, высоты каждого этажа;

- построены эпюры величин безразмерных концентраций по высоте зданий, показывающие, что при строчной застройке концентрации загрязнителей с подветренной стороны уменьшаются до 13,02%, при торцевой – до 2-3%, при периметральной – до 25%, при торцевой под углом – до 18,75%, при смешанной – до 31,16 %, что необходимо учитывать при проектировании приточных устройств системы вентиляции с очисткой воздуха;

- предложенная методика расчёта вертикального распределения концентраций загрязнителей в приточном воздухе учитывает изменяющуюся по величине и направлению скорость ветра по высоте вблизи зданий при разных типах локальных застроек. Проведены расчёты концентраций загрязнителей в приточном воздухе по разработанной методике и общепринятым методикам расчёта рассеивания загрязнителей (разница от 5-15%).

3. Экспериментально исследовано влияние вертикального распределения концентраций загрязнителей в приточном воздухе на качество и микроклиматические параметры воздушной среды в здании:

- установлена степень влияния вертикального распределения концентраций загрязнителей на качество воздуха в помещениях: в режиме проветривания в воздушной среде в зданиях концентрации загрязнителей достигают до 80-88,5% от концентраций в наружном воздухе, при закрытых оконных проемах от 15-38% (от точечных источников выброса) и от 21,2-46,2% (от передвижных источников);

- разработан алгоритм расчёта для прогнозирования качества наружного и внутреннего воздуха зданий (в режиме проветривания), позволяющий определять параметры приточного воздуха, величину концентраций газообразных загрязнителей в зданиях в зависимости от вертикального распределения их концентраций по высоте в наружном воздухе с учётом типа локальной застройки, метеорологических факторов: температуры ($^{\circ}\text{C}$), скорости движения воздуха (м/с), относительной влажности воздуха (%);

- получены эмпирические зависимости, позволяющие прогнозировать концентрации загрязнителей по высоте в зданиях при различных скоростях ветра и относительной влажности наружного воздуха в режиме проветривания помещений.

4. Проведены экспериментальные исследования вариантов очистки приточного воздуха зданий с помощью конструкции опытного образца устройства с очисткой воздуха:

- исследована зависимость величины интенсивности УФ-излучения 365 нм (6-12 Вт) от расстояния от ламп до пластины TiO_2 с послойно расположенными сорбентами (шунгит, цеолит) на эффективность очистки приточного воздуха в клапанах приточной вентиляции: установлена оптимальная интенсивность УФ-А излучения $8,6 \text{ Вт/м}^2$, расстояние 1 см от пластины TiO_2 до двух ламп (по 6 Вт). Эффективность очистки приточного воздуха от газообразных загрязнителей (оксида углерода (II), фенола, формальдегида, углеводородов алифатических) с помощью фотокаталитического фильтра с сорбентами шунгитом, цеолитом, силикагелем толщиной 20 мм повысилась от 88,89-95,79%;

- экспериментально исследованы изменения концентраций загрязнителей от продолжительности сорбции на сорбентах (шунгит, цеолит, активированный уголь, силикагель) и катализаторе (диоксиде марганца). При интенсивности движения автотранспорта свыше 2000 авт./ч установлен срок службы сорбентов – 20 суток, от 500-1000

авт./ч – 56 дней; до 500 авт./ч – 90 дней. При последовательном использовании шунгита, силикагеля, диоксида марганца, цеолита эффективность очистки воздуха от 95,35%;

- экспериментально исследовано влияние температуры наружного воздуха на эффективность очистки приточного воздуха: с понижением температуры эффективность очистки приточного воздуха от всех загрязнителей увеличивается от 90-99,97% в связи с тем, что подвижность молекул уменьшается, продолжительность сорбции возрастает в диапазоне измерения от +27,5 до -11,5 °С; от -11,5 до -32 °С;

- экспериментально исследовано влияние скорости движения, относительной влажности наружного воздуха на эффективность очистки приточного воздуха: при увеличении относительной влажности от 30-70% и скорости ветра наружного воздуха концентрации загрязнителей в помещениях уменьшаются на 50-80%.

5. Разработаны методы и способы снижения концентраций газообразных загрязнителей в приточном воздухе зданий в условиях повышенного загрязнения атмосферы:

- экспериментально и теоретически обоснованы оптимальные параметры конструкции приточных клапанов с очисткой воздуха: скорость движения воздуха 2,81 м/с, минимально необходимый диаметр 0,1 м, расход воздуха от 55-300 м³/ч, технические характеристики загрузок фильтров: высота слоя «шунгит» от 7-20 мм и от 6,93-20 мм для «цеолит» в зависимости от загрязнения наружного воздуха по высоте здания (патент на изобретение);

- теоретически и экспериментально обоснован метод расчёта параметров клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха, позволяющий при расходах приточного воздуха от 55 до 300 м³/ч подобрать технические и физико-химические характеристики загрузок фильтров по высоте зданий;

- теоретически и экспериментально установлена закономерность влияния очередности послойного расположения сорбентов (шунгита, цеолита, силикагеля) и их пропорциональные соотношения масс 0,5:0,6:1:0,8 для сорбентов определенного фракционного состава в слоях при наличии катализатора (диоксида марганца) на эффективность очистки приточного воздуха помещений от оксида углерода (II), алифатических углеводородов (C1-C5), фенола, формальдегида от 71,88-93,75% в теплый период года (холодный от 71,88-95%) (патент на изобретение);

- изотермы сорбентов в фильтрах показали, что с уменьшением наружной температуры в диапазоне от +32 °С до -32 °С, процесс сорбции идет медленнее, предел адсорбции становится выше, что позволяет увеличить срок службы сорбентов на 1-2 месяца.

6. Результаты исследований внедрены в практику проектирования приточных устройств вентиляции зданий по снижению концентраций загрязнений воздушной среды помещений:

- программное обеспечение, конструкция клапанов приточной вентиляции с очисткой воздуха, способ очистки приточного воздуха зданий внедрены при проектировании многоэтажных зданий в ОАО «ТДСК», ООО «Уралмаш НГО Холдинг», ПАО «Сибур ТюменьГаз», при проведении мониторинга атмосферного воздуха по высоте зданий лабораторией ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии по Тюменской области». Общая экономическая эффективность составила от 414 720 до 475 630 руб.

Перспективы разработки темы исследования: разработка новых технических решений приточных устройств с очисткой воздуха в зависимости от вертикального загрязнения вредными веществами наружного воздуха зданий от неорганизованных источников выброса; совершенствование методик расчёта для прогнозирования концентраций твердых частиц (пыли) с учётом изменяющихся ветров и их направления вблизи зданий для выбора оптимальной конструкции приточных устройств с очисткой воздуха от наружных источников выброса.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных наукометрических базах данных «Scopus» / «Web of Science»:

1. Litvinova, N.A. Filtering of outside air in HVAC inlet plenums in urban environment / N.A.Litvinova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 687(6), (2019) 066025. -

URL: https://www.researchgate.net/publication/337873015_Filtering_of_outside_air_in_HVAC_inlet_plenums_in_urban_environment (*Scopus*)

2. **Litvinova, N.A.** Carbon monoxide(II) purification in the plenum valves of the building ventilation system / N.A. Litvinova // Ecology and Industry of Russia, 2019, 23(10), pp. 10-15. (*Scopus*)
3. **Litvinova, N.A.** The influence of motor transport emissions on morbidity and health risk of the population of Tyumen city / N.A.Litvinova, S.A. Molotilova // Ekologiya Cheloveka (Human Ecology) (2018), pp. 11-16. (*Scopus*)
4. **Litvinova, N.A.** Supply Ventilation and Prevention of Carbon Monoxide (II) Ingress into Building Premises / N.A.Litvinova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 262 (2017) 012087 doi:10.1088/1757-899X/262/1/012087. (*Scopus*)
5. **Litvinova, N.A.** The air supply hole of the inlet chamber and preventing the inflow of harmful impurities into the ventilation system / N.A. Litvinova // MAGAZINE OF CIVIL ENGINEERING, 2015, 58 (6), pp. 19-31. (*Scopus*)
6. **Litvinova, N.A.** An effective way to clean the supply air along the height of buildings with the help of a ventilation system valve / Litvinova N.A., Azarov V.N. // Russian Journal of Building Construction and Architecture, 2022, 3 (55), pp. 40-54. (*Web of Science*)

Наиболее значимые работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях:

1. **Литвинова, Н. А.** Клапаны с очисткой воздуха от газообразных загрязнителей системы приточной вентиляции / Н. А. Литвинова, В.Н. Азаров // Известия вузов. Строительство. – 2022. – № 4(760). – С. 50-66.
2. **Литвинова, Н.А.** Исследование влияния на эффективность очистки приточного воздуха в клапанах приточной системы вентиляции интенсивности ультрафиолетового излучения совместно с послонно расположенными сорбентами / Н.А. Литвинова, В.Н. Азаров, А.Ф. Шаповал, Р.Я. Брюханова // Инженерный вестник Дона. – 2022. – №11. – URL.: ivdon.ru/magazine/archive/n11y2022/7984
3. **Литвинова, Н. А.** Эффективный способ очистки приточного воздуха по высоте зданий с помощью клапана системы вентиляции / Н. А. Литвинова, В. Н. Азаров // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2022. – № 1 (65). – С. 55-68. - DOI: 10.36622/VSTU.2022.65.1.005.
4. **Литвинова, Н.А.** Исследование вертикального распределения концентраций газообразных загрязнителей внутри помещений зданий в течение суток от автотранспортных магистралей / Н.А. Литвинова, В.Н. Азаров // Инженерный вестник Дона. – 2022. – №2 (86). – С.272-283. – URL.: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2022/7455>
5. **Литвинова, Н.А.** Прогнозирование концентраций загрязнителей внутри помещений многоэтажных зданий от автотранспорта / Н.А. Литвинова, В.Н. Азаров // Экология урбанизированных территорий. – №1. – 2022. – С. 6-14.
6. **Литвинова, Н.А.** О модели вертикального распределения концентраций загрязняющих веществ по высоте зданий с учетом типа локальной застройки / Н.А. Литвинова, В.Н. Азаров // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2021. Вып. 3(84). – С. 108-121.
7. **Литвинова, Н.А.** О закономерностях вертикального распределения концентраций загрязнителей в атмосферном воздухе от автотранспорта жилых зон территорий города / Н.А. Литвинова, В.Н. Азаров // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2021. – № 4(36). – С. 113-129.
8. **Литвинова, Н. А.** Разработка алгоритма программы сводного расчета вертикального распределения безразмерных концентраций газообразных загрязнителей с учетом типа локальной застройки / Н.А. Литвинова, В.Н. Азаров // Вестник Евразийской науки. – 2021. Т.13. – №6. – URL: <https://esj.today/PDF/06SAVN621.pdf>
9. **Литвинова, Н.А.** Разработка программного обеспечения по прогнозированию уровня загрязненности наружного воздуха и обоснованию использования сорбентов в клапанах приточной принудительной вентиляции с очисткой воздуха / Н.А. Литвинова // Вестник Евразийской науки. – 2021. Т.13. – №1. – С.7. – URL: <https://esj.today/PDF/36SAVN121.pdf>
10. **Литвинова, Н.А.** Исследование пылевого фактора в жилых помещениях многоэтажного студенческого общежития / Н.А. Литвинова, В.Н. Азаров и др. // Инженерный вестник Дона. – 2021. – №9(81). – С.311-320. – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n9y2021/7196>
11. **Литвинова, Н.А.** Эффективное применение клапана приточной принудительной вентиляции с очисткой воздуха в многоэтажном строительстве / Н.А. Литвинова // Инженерный вестник Дона. – 2020. – №3(63). – С.25. – URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2020/6356
12. **Литвинова, Н.А.** Рациональное использование клапана приточной вентиляции при прогнозировании качества наружного воздуха зданий городской среды / Н.А. Литвинова // Вестник Евразийской науки. – 2020. Т.12. – №2. – С.10. – URL: <https://esj.today/PDF/41SAVN220.pdf>
13. **Литвинова, Н.А.** Определение понятия «микроклимат» помещения с использованием системно-категориального подхода / А. С. Гульбинас, Н. А. Литвинова // Вестник Евразийской науки. – 2021. Т. 13. – № 5. – URL: <https://esj.today/PDF/15SAVN521.pdf>
14. **Литвинова, Н.А.** Теоретическое обоснование конструкции приточного клапана с фильтрацией воздуха / Н.А. Литвинова // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – 2020. – № 3(39). – С.43-56.

15. **Литвинова, Н.А.** Очистка воздуха помещений от загрязняющих веществ с использованием воздушного приточного клапана с фотокаталитическим фильтром / Н.А. Литвинова / Экология урбанизированных территорий. – 2019. – № 3. – С. 81-87.
16. **Литвинова, Н.А.** Очистка воздуха от оксида углерода (II) в приточных клапанах системы вентиляции зданий / Н.А. Литвинова // Экология и промышленность России. – 2019. – № 23(10). – С. 10-15.
17. **Литвинова, Н.А.** Выбор и обоснование способа очистки воздуха от оксида углерода (II) в зданиях городской среды / Н.А. Литвинова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2019. – №2 (72). – С. 24-31.
18. **Литвинова, Н.А.** Влияние выбросов автотранспорта на заболеваемость и риск здоровью населения г. Тюмени / Н.А. Литвинова, С.А. Молотилова // Экология человека. – 2018. – №8. – С. 11-16.
19. **Литвинова, Н.А.** Чистота воздуха в зданиях в условиях высокой интенсивности движения автотранспорта / Н.А. Литвинова // Безопасность в техносфере. – 2015. – №6. – С. 23-26.
20. **Литвинова, Н.А.** Расчет поступления из внешней среды в помещение зданий выбросов загрязняющих веществ от котельных / Н.А. Литвинова // Безопасность жизнедеятельности. – 2015. – №12. – С. 31-34.
21. **Литвинова, Н.А.** Распределение концентрации оксида углерода (II) по высоте здания от автотранспорта и вентиляция помещений / Н.А. Литвинова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 420. – №1; URL: <http://www.science-education.ru/121-19566>.
22. **Литвинова, Н.А.** Место забора воздуха для вентиляции помещений зданий городской среды [Текст] / Н.А. Литвинова // Естественные и технические науки. – 2015. – №3 (81). – С. 213-217.
23. **Литвинова, Н.А.** Воздухоприемное отверстие приточной камеры и предотвращение поступления в вентиляционную систему вредных примесей / Н.А. Литвинова // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №58 (6). – С. 19-31.
24. **Литвинова, Н.А.** Формирование экологически безопасной воздушной среды помещения в условиях загрязненного атмосферного воздуха / Н.А. Литвинова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2015. – №4(58). – С. 23-28.
25. **Литвинова, Н.А.** Метод расчета концентрации окиси углерода в наружном воздухе / Н.А. Литвинова, Т.В. Германова // Известия вузов. Нефть и газ. – 2009. – № 2. – С. 106–111.

Монографии:

1. **Литвинова, Н.А.** Способы очистки воздуха в условиях повышенного загрязнения атмосферы городской среды: монография / Н.А. Литвинова, С.А. Гузеева. – Тюмень: БИК ТИУ, 2020. – 169 с.
2. **Литвинова, Н.А.** Улучшение качества воздушной среды помещений с учетом качества наружного воздуха: монография / Н.А. Литвинова. – Тюмень: БИК ТИУ, 2019. – 160 с.
3. **Литвинова, Н.А.** Вентиляция и качество воздуха в зданиях городской среды: монография / Н.А. Литвинова. – Москва: ИНФРА-М, 2018. – 173 с.
4. **Литвинова, Н.А.** Автотранспорт и экология воздушной среды города: монография / Н.А. Литвинова. – Тюмень: РИО ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ», 2016. – 170 с.
5. **Литвинова, Н.А.** Качество воздуха в зданиях городской среды: монография / Н.А. Литвинова. – Тюмень: РИО ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ», 2015. – 180 с.

Патенты на изобретения, полезные модели и иные объекты интеллектуальной собственности:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет концентраций загрязнителей внутри помещений многоэтажных зданий по времени суток от автотранспортных магистралей в городской среде. **Литвинова, Н.А.**, Азаров В.Н. Патентообладатель Н.А. Литвинова. Номер регистрации № 2022610810 от 17.01.22, номер и дата поступления заявки: 2021682453, 29.12.2021, дата публикации: 17.01.2022.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Сводный расчет вертикального распределения безразмерных концентраций по высоте зданий с учетом типа локальной застройки. **Литвинова, Н.А.**, Азаров В.Н. Патентообладатель Н.А. Литвинова. Номер регистрации № 2021664849 от 14.09.2021, номер и дата поступления заявки: 2021663802 02.09.2021, дата публикации: 14.09.2021.
3. Патент на изобретение. Клапан приточной принудительной вентиляции с очисткой воздуха. **Литвинова, Н.А.** Патентообладатель ФГБОУ ТИУ. Патент на изобретение №2 744 623 С 1. заявл.: 17.06.2020; опубл.: 12.03.2021. Бюл. № 8. – 7 с.
4. Патент на изобретение. Способ очистки от газообразных загрязнителей приточного воздуха помещений. **Литвинова, Н.А.** Патентообладатель Н.А. Литвинова. Патент на изобретение № 2 747863. заявл.: 06.11.2020; опубл.: 17.05.2021. Бюл. № 14. – 8 с.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Прогноз (расчет) концентраций загрязнителей по высоте зданий в приточном воздухе от стационарных высотных источников и автотранспорта. **Литвинова, Н.А.** Патентообладатель Н.А. Литвинова. Номер регистрации программы №2020618133 от 20.07.2020, номер и дата поступления заявки: 2020617335, 16.07.2020, дата публикации 20.07.2020.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет и обоснование технических характеристик сорбентов в клапанах приточной принудительной вентиляции зданий в условиях повышенного загрязнения атмосферы. **Литвинова, Н.А.** Патентообладатель Н.А. Литвинова. Номер регистрации: 2020660657, дата регистрации: 09.09.2020, номер и дата поступления заявки: 2020619903, 30.08.2020, дата публикации: 09.09.2020.

Наиболее значимые отраслевые издания и материалы конференций:

1. **Литвинова, Н.А.** Расчет рассеивания и оценка выбросов в атмосферный воздух от парового котла «ICI CALDAIE AX 2500» / Е.И. Белоцеркова, Н.А. Литвинова. Материалы Международной научно-практической конференции: Арктика: современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе. – Тюмень, 2021. – С. 169-172.
2. **Литвинова, Н.А.** Причины аварий на котельной установке и повышение экологической безопасности / Е.И. Белоцеркова, Н.А. Литвинова. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции: Техногенная и природная безопасность. – Саратов, 2021. – С. 11-15.
3. **Литвинова, Н.А.** Исследование выбросов автозаправочных станций в атмосферу на территории г. Тюмени и оптимизация системы вентиляции / В.Н. Мишарина, И.Ю. Томус, Н.А. Литвинова. Материалы Международной научно-практической конференции: Арктика: современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе.: в 2 т. – Тюмень, 2020. – С. 193-197.
4. **Литвинова, Н.А.** Разработка воздухоочистителя для помещений лечебно-профилактических учреждений / В.Ю. Сивухина, Н.С. Пашин, В.П. Соловьев, Е.Е. Михайлова, Н.А. Литвинова. Материалы Международной научно-практической конференции молодых исследователей им. Д. И. Менделеева, посвященной 10-летию Института промышленных технологий и инжиниринга. – Тюмень, 2019. – С. 375-378.
5. **Литвинова, Н.А.** Исследования концентрации двуокси азота от передвижных источников в городской среде / В.В. Котов, Н.А. Литвинова // Молодой ученый. – 2018. – № 22 (208). – С. 160-162.
6. **Литвинова, Н.А.** Оценка выбросов в атмосферный воздух от паровых котлов VITOMAX 200-HS / Н.А. Литвинова, В.В. Пинигин. Материалы XIX Международной научно-практической конференции «Проблемы управления речными бассейнами при освоении Сибири и Арктики в контексте глобального изменения климата планеты в XXI веке». Том III. – Тюмень: ТИУ, 2017. – С.167-171.
7. **Литвинова, Н.А.** О проблеме взаимодействия «человек-среда» / Н.А. Литвинова, Д.О. Литвинов, В.Н. Шиндин. Материалы международной научно-практической конференции «Современные тенденции в фундаментальных и прикладных исследованиях». – Рязань: ЦФиПИ, 2015. – С. 39-41.
8. **Литвинова, Н.А.** Организация воздухообмена и качество наружного воздуха / Н.А. Литвинова. Материалы Международной научно-практической конференции. – Москва: АР-Консалт, 2014. – С. 23-25.
9. **Литвинова, Н.А.** Качество воздуха по высоте зданий в зоне действия котельных / Н.А. Литвинова. Сборник материалов Международной научно-практической конференции 31 июля. 2014 г. – Тамбов: усом, 2014. – С. 95-96.
10. **Литвинова, Н.А.** Котельные и проблема обоснования места воздухозабора / Н.А. Литвинова, Л.В. Тищенко. Сборник статей IV Международной конференции «Актуальные проблемы экологии и охраны труда». – Курск: КГУ, 2012. – С. 112-116.
11. **Литвинова, Н.А.** Влияние скорости ветра на рассеивание выбросов от точечных источников в условиях городской застройки / Н.А. Литвинова // Экология и охрана труда. – 2012. – №1-2 (февраль). – С. 22–25.
12. **Литвинова, Н.А.** Методика расчета для выбора места воздухозабора с учетом выбросов точечных источников различной высоты / Н.А. Литвинова // Экология и охрана труда. – 2011. – №5. – С. 49–53.
13. **Литвинова, Н.А.** Методика расчета для обоснования выбора места воздухозабора с учетом передвижных источников / Н.А. Литвинова // Экология и охрана труда. – 2010. – № 12. – С. 49–50.
14. **Литвинова, Н.А.** К вопросу обоснования выбора места воздухозабора / Н.А. Литвинова // Строительный Вестник Тюменской области. – 2010. – №1. – С.46–49.
15. **Литвинова, Н.А.** Автотранспорт и чистота воздуха в помещениях / Н.А. Литвинова. Сборник статей II Международной конференции «Актуальные проблемы экологии и охраны труда». – Курск: КГУ, 2010. – С. 113-116.
16. **Литвинова, Н.А.** Автотранспорт и качество воздуха помещений / Н.А. Литвинова. Сборник Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы регионов». – Москва: РГАЗУ, 2010. – С.51-53.
17. **Литвинова, Н.А.** Разработка рекомендаций по улучшению качества воздушной среды помещений / Н.А.Литвинова. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции ТюмГАСУ. – Тюмень: ТюмГАСУ, 2009. – С. 10–14.
18. **Литвинова, Н.А.** Методы оптимизации воздушного режима зданий и качество приточного воздуха / Н.А. Литвинова // Строительный Вестник Тюменской области. – 2009. – № 1. – С. 12–14.