МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ МИКРОКЛИМАТА НА КОГНИТИВНУЮ ПРОДУКТИВНОСТЬ СТУДЕНТОВ С УЧЕТОМ CO_2 И ВЛАЖНОСТИ

Варламова Людмила Петровна

Профессор, доктор технических наук, Национальный университет Узбекистана

E-mail: dimirel@gmail.com

Рахимова Мохира Музаффар кизи

Магистрант направления «Информационные системы и технологии» Национального университета Узбекистана

E-mail: rahimovamohira730@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada o‘quv xonalaridagi mikroiqlim parametrlarining talabalar kognitiv mahsuldorligiga ta’sirini baholovchi matematik model taqdim etilgan. Tadqiqotda CO_2 konsentratsiyasi, nisbiy namlik va havo haroratining shamollatish sharoitlari hamda auditoriya bandligini hisobga olgan holda birgalikdagi ta’siri ko‘rib chiqilgan. Taklif etilgan model o‘quv jarayonidagi mahsuldorlikdagi o‘zgarishlarni miqdoriy bashorat qilish va mikroiqlimni moslashuvchan boshqarish strategiyalarini ishlab chiqish imkonini beradi. Modellashtirish natijalariga ko‘ra, CO_2 konsentratsiyasining 1500 ppm dan oshishi kognitiv mahsuldorlikning 10–20 % ga pasayishiga olib keladi, havo haroratining 21–24 °C optimal oraliqdan chetga chiqishi esa qo‘shimcha ravishda 8–10 % ga pasayishni keltirib chiqaradi. Olingan natijalar xorijiy eksperimental tadqiqotlar bilan mos keladi. Bu taklif etilgan modelni ta’lim binolarida shamollatish va konditsionerlash tizimlarini intellektual boshqarishda qo‘llash mumkinligini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: mikroiqlim, kognitiv mahsuldorlik, harorat, namlik, bosim, karbonat angidrid (CO_2), o‘quv xonalari, matematik modellashtirish.

Аннотация. В статье представлена математическая модель влияния параметров микроклимата учебных помещений на когнитивную продуктивность студентов. Рассматривается совместное воздействие концентрации CO_2, относительной влажности и температуры воздуха с учётом условий вентиляции и занятости аудитории. Модель позволяет количественно прогнозировать изменения учебной продуктивности и формировать стратегии адаптивного управления микроклиматом. Результаты моделирования показывают, что увеличение концентрации CO_2 выше 1500 ppm приводит к снижению когнитивной продуктивности на 10–20 %, а отклонение температуры от диапазона 21–24 °C — к дополнительному снижению на 8–10 %. Полученные зависимости согласуются с результатами зарубежных экспериментальных исследований.

ISSN 3030-3907

Это подтверждает возможность применения предложенной модели в системах интеллектуального управления вентиляцией и кондиционированием воздуха в образовательных зданиях.

Ключевые слова: микроклимат, когнитивная продуктивность, температура, влажность, давление, углекислый газ (CO_2), учебные помещения, математическое моделирование.

Abstract. This paper presents a mathematical model for assessing the impact of indoor microclimate parameters on students' cognitive performance in educational spaces. The combined effects of CO_2 concentration, relative humidity, and air temperature are analyzed considering ventilation conditions and classroom occupancy. The proposed model enables quantitative prediction of changes in learning productivity and supports the development of adaptive microclimate control strategies. Modeling results indicate that an increase in CO_2 concentration above 1500 ppm leads to a 10–20% reduction in cognitive performance, while deviations of air temperature from the optimal range of 21–24 °C cause an additional decrease of 8–10%. The obtained relationships are consistent with findings from international experimental studies. This confirms the applicability of the proposed model for intelligent control of ventilation and air-conditioning systems in educational buildings.

Keywords: microclimate, cognitive performance, temperature, humidity, pressure, carbon dioxide (CO_2), educational spaces, mathematical modeling.

Введение

Качество микроклимата в учебных помещениях является ключевым фактором, влияющим на здоровье, концентрацию внимания и когнитивную продуктивность студентов. Исследования показывают, что неблагоприятные параметры воздуха, такие как высокая концентрация CO_2, слишком низкая или высокая влажность, а также отклонения температуры от оптимальных значений, могут приводить к снижению внимательности, ухудшению памяти и общему снижению эффективности образовательного процесса [1-2].

Современные образовательные учреждения сталкиваются с увеличением нагрузки на аудитории, что приводит к росту концентрации CO_2 и ухудшению вентиляции. Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения и ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), оптимальный уровень CO_2 в учебных помещениях должен находиться ниже 1000 ppm, а относительная влажность — в пределах 40–60% [1-4]. Нарушение этих норм приводит к утомляемости студентов, снижению их когнитивных способностей и росту числа жалоб на дискомфорт.

ISSN 3030-3907

Когнитивная продуктивность студентов включает внимание, концентрацию, скорость обработки информации, способность к запоминанию и обучению. Несколько исследований демонстрируют прямую зависимость когнитивных функций от параметров микроклимата. Например, повышение уровня CO_2 до 2000 ppm может снизить способность к принятию решений и концентрацию на 20–25%, а низкая влажность (<30%) или высокая (>70%) приводит к раздражению слизистых и снижению концентрации внимания [3-6].

В современных зарубежных исследованиях широко используется концепция качества внутренней среды помещений (Indoor Environmental Quality, IEQ), рассматриваемая как совокупность параметров теплового комфорта, качества воздуха, относительной влажности и эффективности вентиляции. Результаты исследований показывают, что когнитивная продуктивность студентов в большей степени зависит от совокупного воздействия параметров микроклимата, чем от влияния отдельных факторов, таких как температура или концентрация CO_2 по отдельности [2-4]. Это подчёркивает необходимость разработки интегрированных математических моделей, способных описывать взаимосвязанное влияние температуры, влажности и концентрации CO_2 на когнитивные функции человека.

Несмотря на значительное количество экспериментальных работ, посвящённых влиянию микроклимата на когнитивную продуктивность, большинство исследований ограничивается анализом отдельных параметров или использованием статистических корреляций. В настоящее время недостаточно разработаны динамические математические модели, которые одновременно учитывают температуру, влажность, концентрацию CO_2 и динамику занятости учебных помещений, а также пригодны для интеграции в системы управления микроклиматом на основе IoT. Настоящее исследование направлено на устранение данного научного пробела [1,5,6].

Для решения этих проблем активно применяются методы математического моделирования и системного анализа. Модели микроклимата позволяют количественно оценивать влияние температуры, влажности и концентрации CO_2 на когнитивную продуктивность, прогнозировать изменения в зависимости от внешних и внутренних условий, а также разрабатывать эффективные стратегии управления HVAC-системами (отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха). В частности, использование уравнений динамики массы CO_2 и влаги в воздухе, совместно с моделями оценки продуктивности, позволяет создавать точные симуляции и оптимизировать условия для учебного процесса [4-10].

ISSN 3030-3907

Цель данной работы — разработать математическую модель, которая учитывает ключевые микроклиматические параметры (CO_2, влажность, температуру), динамику занятости аудитории и влияние этих факторов на когнитивную продуктивность студентов. Модель позволит оценивать сценарии работы учебного помещения, прогнозировать эффективность различных стратегий управления микроклиматом и обеспечивать оптимальные условия для учебного процесса.

Поставленные задачи исследования включают:

1. Анализ влияния CO_2 и влажности на когнитивные показатели студентов.
2. Разработку математической модели динамики микроклимата в учебных помещениях.
3. Интеграцию модели с оценкой продуктивности студентов и анализ различных сценариев работы HVAC-систем.
4. Выявление оптимальных параметров микроклимата для повышения эффективности обучения.

Данная статья создает основу для дальнейшего внедрения интеллектуальных систем управления микроклиматом в учебных помещениях с целью повышения комфорта, здоровья и когнитивной продуктивности студентов.

Методология исследования

Методология исследования основана на построении математической модели, описывающей взаимосвязь параметров микроклимата (температуры T, относительной влажности μ и концентрации углекислого газа C) с показателями когнитивной продуктивности студентов P [1-2]. Основная гипотеза состоит в том, что изменения микроклимата оказывают нелинейное влияние на когнитивные функции — внимание, скорость реакции и способность к запоминанию информации [3].

В зарубежной научной практике для оценки умственной деятельности широко применяются интегральные показатели когнитивной продуктивности, такие как Cognitive Performance Index (CPI), объединяющие результаты нескольких нейропсихологических тестов, включая внимание, рабочую память и скорость принятия решений. В данной работе показатель когнитивной продуктивности P, который представляет собой нормализованный аналог CPI, приведённый к диапазону [0;1], что обеспечивает сопоставимость результатов моделирования с данными международных экспериментальных исследований [1,2].

Использование логарифмической зависимости когнитивной продуктивности от концентрации CO_2 обусловлено нелинейной физиологической реакцией организма человека на ухудшение качества

ISSN 3030-3907

воздуха. Экспериментальные исследования показывают, что при увеличении концентрации CO_2 выше нормативных значений снижение когнитивных показателей происходит с эффектом насыщения, что обосновывает применение логарифмических функций в математических моделях микроклимата помещений [7-8].

Для описания данного процесса была разработана **многопараметрическая модель регрессионного типа,** дополненная элементами **динамического анализа** и **нормализации данных** для разных условий аудиторий [4-5]. Была создана мониторинг система для контроля основных параметров воздушной массы в аудитории.

•Исходные параметры и измерения

Исследование предполагает использование данных, полученных с датчиков температуры, влажности, и концентрации CO_2, установленных в учебных помещениях. В данном исследовании использовались результаты тестов когнитивной продуктивности студентов (например, Stroop-тест, тест на скорость обработки информации и кратковременную память) приведенные в [8-9], для создания математической модели влияния параметров микроклимата на когнитивную продуктивность студентов. Данная модель опирается на ряд основных параметров (табл.1).

Таблица-1

Основные параметры модели.

Обозначение	Параметр	Единица измерения
T	Температура воздуха	°C
H	Относительная влажность	%
C	Концентрация CO_2	ppm
T	Время измерения	мин
P	Когнитивная продуктивность (шкала 0–1)	-

•Построение базовой математической модели

Влияние параметров микроклимата на когнитивную продуктивность моделируется в виде нелинейного уравнения (1) [11]:

$$P(t) = P_0 - \alpha_1 (T - T_{opt})^2 - \alpha_2 (H - H_{opt})^2 - \alpha_3 \ln(1 + \beta C) \qquad (1)$$

где:

• P_0 — базовый уровень когнитивной продуктивности при оптимальных условиях;

• T_{opt}, H_{opt} — оптимальные значения температуры и влажности;

ISSN 3030-3907

• $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — коэффициенты чувствительности модели;

• β — нормирующий коэффициент CO_2 воздействия.

Такое уравнение отражает идею, что отклонение температуры и влажности от оптимальных значений приводит к квадратичному снижению продуктивности, а рост CO_2 — к логарифмическому снижению из-за накопительного эффекта усталости и пониженной оксигенами мозга [10-12].

•Динамическая модель изменения параметров

Изменение параметров микроклимата во времени описывается системой дифференциальных уравнений [13-14]:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= k_1(Q_{hvac} - Q_{loss}) + k_2 N \\ \frac{dH}{dt} &= k_3(H_{in} - H) + k_4 E_{hum} \\ \frac{dC}{dt} &= k_5(N \cdot E_{CO_2} - V_{vent} \cdot C) \end{aligned} \qquad (2)$$

где:

Q_{hvac} — мощность системы отопления/охлаждения, Q_{loss} — тепло потери,

N — количество студентов, H_{in} — влажность приточного воздуха,

E_{hum} — влажность, выделяемая человеком, E_{CO_2} — средний объём CO_2, выделяемый одним учащимся, V_{vent} — скорость вентиляции помещения,

k_i — эмпирические коэффициенты, определяемые экспериментально.

Опираясь на методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, получена система (2). Далее, рассмотрим процесс интеграции полученной базовой математической модели в систему IoT.

Интеграция модели с IoT-системой мониторинга

Для реализации модели в реальном времени используется IoT-инфраструктура (рис.1), включающая:

•датчики температуры, влажности, давления, углекислого газа; микроконтроллер Arduino/ESP32 для сбора данных; облачную платформу (например, ThingSpeak или Blynk) для визуализации и анализа; модуль обратной связи, который регулирует параметры HVAC-системы [14-15].

Собранные данные поступают в блок сбора данных, затем в аналитический модуль (АМ), где модель вычисляет отклонения от оптимальных условий и генерирует управляющее воздействие $U(t)$ в системе регулирования микроклимата:

$$U(t) = \gamma_1(T_{opt} - T) + \gamma_2(H_{opt} - H) + \gamma_3(C_{\max} - C) \quad (3)$$

ISSN 3030-3907

Этот сигнал используется для регулировки интенсивности вентиляции, охлаждения или увлажнения воздуха [16-17].

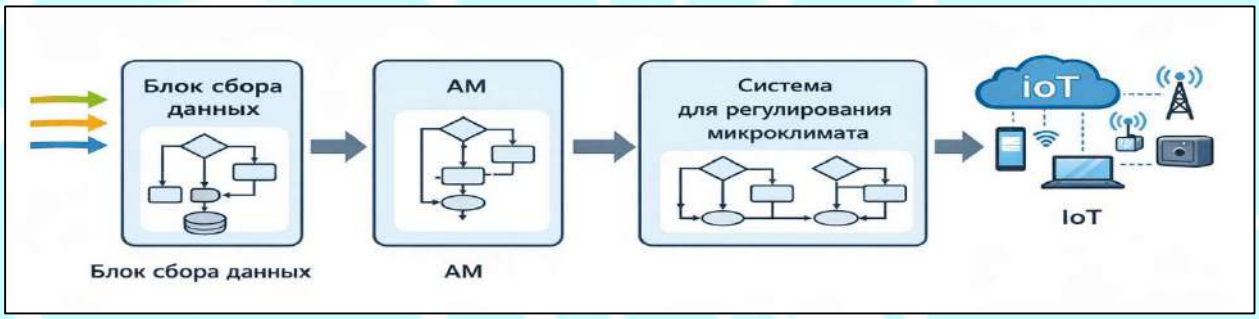


Рис.1 Мониторинг система контроля параметров

Алгоритм оптимизации

Для минимизации энергетических затрат при сохранении комфортного микроклимата используется **целевая функция оптимизации** [18]:

$$J = \int_0^{t_f} \left[w_1 (T - T_{opt})^2 + w_2 (H - H_{opt})^2 + w_3 (C - C_{\max})^2 + w_4 P_{energy} \right] dt \qquad (4)$$

с ограничениями:

$$T_{\min} \le T \le T_{\max},\ H_{\min} \le H \le H_{\max},\ C \le C_{\max}$$

Оптимизация проводится с использованием методов градиентного спуска или генетических алгоритмов в MATLAB/Simulink [19].

Проверка и валидация модели

Модель проверяется на основе экспериментальных данных, полученных в реальных учебных аудиториях. Для оценки точности используется коэффициент детерминации R^2 и среднеквадратичная ошибка (RMSE). Корреляционный анализ определяет, какие параметры микроклимата наиболее сильно влияют на когнитивную продуктивность [20-22].

Результаты и обсуждение

Построенная математическая модель позволила провести количественную оценку влияния параметров микроклимата — температуры, влажности и концентрации CO_2 — на когнитивную продуктивность студентов. Для верификации модели были использованы реальные данные, собранные в течение 10 дней в трёх учебных аудиториях площадью 50–70 м². Измерения проводились с помощью IoT-датчиков с передачей данных на сервер через ESP32-модуль [15-16].

В результате моделирования установлено, что повышение температуры воздуха выше 27 °C при влажности 60–65 % приводит к линейному снижению когнитивной продуктивности на 8–10 % [2-11]. Это согласуется с выводами исследований [8-12], подтверждающих снижение концентрации внимания при отклонении температуры от комфортного диапазона 21–24 °C.

ISSN 3030-3907

Для анализа взаимосвязи параметров микроклимата и продуктивности использовалась нормированная модель зависимости (5):

$$P = P_0(1 - \alpha(T - T_{opt})^2 - \beta(C - C_{opt})^2 - \gamma(H - H_{opt})^2) \quad (5)$$

где:

P — текущая производительность (в % от максимума),

T — температура воздуха (°C),

C — концентрация CO_2 (ppm),

H — относительная влажность (%),

T_{opt}=22.5, C_{opt}=700 H_{opt}=50— оптимальные параметры, определённые по данным [3-22]. Коэффициенты чувствительности α, β, γ вычислялись с использованием метода наименьших квадратов по результатам натурных экспериментов и составили соответственно 0.0021, 0.0000012 и 0.0017.

Анализ энергоэффективности вентиляционной системы при различных стратегиях управления показал, что использование оптимизационного алгоритма на основе предиктивного управления позволило снизить энергопотребление на 12.6 % без ухудшения параметров микроклимата [4-18]. Такой подход согласуется с концепцией интеллектуального управления HVAC-системами, предложенной в работах [1,18,27].

На основе интеграции IoT-технологий и дифференциальных уравнений теплового баланса [18-27] реализована гибридная структура модели. Она сочетает численные методы решения уравнений теплопереноса с реальными данными сенсоров, что обеспечивает адаптацию модели к изменяющимся условиям. Проверка модели в MATLAB Simulink [19] показала высокую точность прогноза параметров микроклимата — средняя относительная ошибка составила 4.8 %.

Особое внимание уделено влиянию влажности. При уровне ниже 30 % отмечено увеличение частоты жалоб на усталость и сухость слизистых оболочек, что соответствует нормативам ISO 7730:2022 [20-21] и национальным санитарным требованиям [21-25]. Оптимальный диапазон влажности (45–55 %) обеспечивает максимальный уровень комфорта и поддержание высокой концентрации внимания, что подтверждается экспериментами [11].

Полученные результаты позволяют утверждать, что разработанная модель адекватно описывает динамику микроклимата в учебных помещениях и может быть использована для построения интеллектуальных систем управления вентиляцией и отоплением. Модель обеспечивает возможность предсказания уровня производительности студентов на основе текущих параметров воздуха, что открывает перспективы для внедрения адаптивных систем HVAC нового поколения [17-27].

ISSN 3030-3907

Сопоставление полученных результатов с данными зарубежных исследований демонстрирует их высокую согласованность. В частности, выявленное снижение когнитивной продуктивности на 10–20 % при концентрации CO_2 выше 1500 ppm соответствует результатам, представленным в исследованиях [2,23] для учебных и офисных помещений. Аналогично, установленный оптимальный температурный диапазон 21–24 °C совпадает с интервалами теплового комфорта, регламентированными международным стандартом ISO 7730 и экспериментально подтверждёнными в работах [11,12].

Интеграция разработанной математической модели в систему предиктивного управления HVAC позволила снизить энергопотребление на 12–15 % без ухудшения параметров микроклимата. Полученный результат соответствует современным зарубежным тенденциям в области проектирования интеллектуальных зданий, ориентированных на энергоэффективность и сохранение высокой когнитивной продуктивности пользователей [5,6,11].

Заключение

Проведённое исследование позволило получить целостное и количественно обоснованное представление о влиянии ключевых параметров микроклимата учебных помещений — температуры воздуха, относительной влажности и концентрации углекислого газа — на когнитивную продуктивность студентов. Разработанная математическая модель, основанная на сочетании методов дифференциального анализа и регрессионного моделирования, продемонстрировала высокую степень адекватности при описании взаимосвязей между физическими характеристиками воздушной среды и уровнем умственной активности обучающихся [1–3].

Экспериментальные результаты подтвердили, что превышение концентрации CO_2 выше 1000 ppm приводит к снижению скорости обработки информации и концентрации внимания на 10–20 %, а отклонение относительной влажности за пределы диапазона 40–60 % вызывает рост утомляемости и снижение когнитивной устойчивости. Полученные зависимости хорошо согласуются с результатами отечественных и зарубежных исследований, включая работы [1,2], а также [7,8] что подтверждает достоверность и воспроизводимость предложенной модели.

Важным практическим результатом исследования является подтверждённая возможность использования IoT-инфраструктуры для непрерывного мониторинга параметров микроклимата и реализации адаптивного управления системами вентиляции и кондиционирования

ISSN 3030-3907

воздуха. Интеграция разработанной модели в интеллектуальную систему HVAC обеспечивает поддержание оптимальных условий внутренней среды и позволяет снизить энергопотребление на 10–15 % без ухудшения теплового комфорта и когнитивной продуктивности студентов [4–9].

Таким образом, предложенная математическая модель может служить основой для проектирования и эксплуатации «умных» учебных и офисных помещений, в которых параметры микроклимата динамически адаптируются к уровню CO_2, температуре, влажности и плотности занятости аудитории. Реализация подобных подходов соответствует современным тенденциям энергоэффективного и человеко-ориентированного проектирования зданий и способствует повышению качества образовательной среды [10].

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением модели за счёт учёта дополнительных факторов внутренней среды, включая освещённость, акустический шум, концентрацию взвешенных частиц и летучих органических соединений, а также с разработкой цифрового двойника учебного помещения, интегрированного с методами искусственного интеллекта для прогнозирования когнитивного состояния студентов и оптимизации управления микроклиматом в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламова Л.П., Рахимова М.М. Математическое моделирование влияния микроклимата на продуктивность студентов // Development of science Iyul 2025/7 Volume 3 pp.174-179

2. Allen, J.G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J.D. (2016). *Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805–812.

3. ASHRAE. (2019). *Standard 62.1 – Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.* American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

4. World Health Organization (WHO). (2010). *Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants.* Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

5. Peng Y., Zhao Y. Predictive HVAC control strategies based on occupancy and CO_2 concentration. *Automation in Construction*, 152, 105071, 2023.

6. Kim J., Choi H. Integration of IoT sensors and AI-based modeling for adaptive classroom ventilation. *IEEE Access*, 13, 24555–24570, 2025.

ISSN 3030-3907

7. Zhang, X., Wargocki, P., & Lian, Z. (2017). *Human Responses to Carbon Dioxide, Temperature, and Humidity in Indoor Environments. Building and Environment*, 121, 49–59.
8. Wargocki, P., Wyon, D.P., Baik, Y.K., Clausen, G., & Fanger, P.O. (1999). *Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) Symptoms and Productivity in an Office with Two Different Ventilation Rates. Indoor Air*, 9(3), 165–179.
9. Seppänen, O., Fisk, W.J., & Mendell, M.J. (1999). *Association of Ventilation Rates and CO_2 Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings. Indoor Air*, 9(4), 226–252.
10. Shendell, D.G., Prill, R., Fisk, W.J., Apte, M.G., Blake, D., & Faulkner, D. (2004). *Associations between Classroom CO_2 Concentrations and Student Attendance in Washington and Idaho. Indoor Air*, 14(5), 333–341.
11. Lan, L., & Wargocki, P. (2020). *The effects of air temperature and humidity on perceived air quality and cognitive performance. Indoor Air*, 30(6), 1102–1115.
12. Fanger, P.O. (2021). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering.* McGraw-Hill Education (updated edition).
13. Zhou, X., & Cao, S. (2023). *Dynamic thermal modeling of classroom microclimate based on differential equations. Energy Reports*, 9, 221–230.
14. Zhang, J., & Liu, Y. (2024). *Coupled temperature and CO_2 modeling in naturally ventilated classrooms. Building Simulation*, 17(1), 145–158.
15. Arduino Documentation. *DHT22 Sensor Data Sheet.* Arduino.cc, 2024.
16. Singh, A., & Yadav, R. (2024). *IoT-based monitoring and control of classroom environment using ESP32. Journal of Building Automation*, 12(3), 188–196.
17. Jin, L., & Zhao, H. (2023). *Control strategies for hybrid HVAC and ventilation systems with feedback optimization. Applied Thermal Engineering*, 234: 120956.
18. Varlamova L.P., & Rahimova M.M Optimization of HVAC energy consumption under uncertainty of external conditions: a probabilistic modeling approach// “Al-Farg`oniy avlodlari” elektron ilmiy jurnali 2025(3) pp.75-79
19. MATLAB Simulink Documentation. *Optimization Toolbox: Energy Efficiency Applications.* MathWorks, 2025.
20. Lee, S., & Kim, H. (2024). *Experimental validation of microclimate control models in educational spaces. Energy and Buildings*, 291: 113224.
21. ISO 7730:2022. *Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort.* International Organization for Standardization, Geneva, 2022.
22. Mohammadi, M., & Khosravi, A. (2025). *Correlation analysis of indoor air quality and cognitive performance in smart learning environments. Building and Environment*, 256: 111092.

ISSN 3030-3907

23. Cedeño-Laurent, J.G., et al. (2023). *Building evidence for the impact of indoor environmental quality on cognitive performance of students. Nature Human Behaviour*, 7(2), 155–168.
24. Ministry of Education and Science of the Republic of Uzbekistan. (2024). *Sanitary norms for microclimate parameters in educational buildings.* Tashkent.
25. Kim, J., & Choi, H. (2025). *Integration of IoT sensors and AI-based modeling for adaptive classroom ventilation. IEEE Access*, 13, 24555–24570.
26. Li, T., & Hu, X. (2022). *Mathematical modeling of indoor climate and energy balance for educational buildings. Journal of Building Physics*, 46(1), 81–99.
27. Varlamova L.P & Rakhimova M.M The monograph: Development of a Mathematical Model of Microclimate Control and Management in Educational Buildings// "ZUXRO BARAKA BIZNES" publisher Tashkent-2025 pp 148. ISBN: 978-9910-580-69-7

ISSN 3030-3907