

Научная статья

УДК 004.942

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-6>



Возможности применения гибридных цифровых двойников для решения задачи предиктивного энергоэффективного управления в многоквартирном доме

Иван Владиславович Поддубный[✉], **Светлана Александровна Лысенкова**
Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты измерений параметров микроклимата в жилом помещении квартиры многоквартирного дома в северном регионе с акцентом на концентрацию углекислого газа в воздухе как наиболее чувствительный показатель качества воздуха для организма человека. Предмет исследования составляет динамика концентрации углекислого газа, температуры, относительной влажности и давления в реальных условиях проживания. Цель работы заключается в оценке инерционности микроклимата жилого помещения, сопоставлении измеренных уровней углекислого газа с действующими рекомендациями по качеству воздуха и обосновании целесообразности применения цифрового двойника для решения задачи предиктивного управления системой умного дома. Методически исследование основано на применении измерительного устройства на базе микроконтроллера ESP32-C3 Super Mini с датчиками АНТ20, BMP280 и SCD40, формирующего временные ряды микроклиматических параметров. Показано, что при ночном пребывании одного человека концентрация углекислого газа монотонно возрастает от порядка 1 100 см³/м³ до значений выше 1 800 см³/м³, выходящих за пределы норм, рекомендуемых для жилых помещений. Научная новизна работы заключается в экспериментальном обосновании того факта, что микроклимат спальни можно рассматривать как инерционную систему, для которой целесообразно применение инструментов предиктивного управления устройствами умного дома на основе прогнозируемой динамики углекислого газа. Также приводится обоснование того, что цифровой двойник, интегрирующий данные датчиков и модель помещения, способен заранее выявлять моменты ухудшения качества воздуха и инициировать наиболее энергосберегающие управляющие воздействия.

Ключевые слова: цифровой двойник, микроклимат квартиры, предиктивное управление, энергоэффективность, интеллектуальное управление, датчики микроклимата

Для цитирования: Поддубный И. В., Лысенкова С. А. Возможности применения гибридных цифровых двойников для решения задачи предиктивного энергоэффективного управления в многоквартирном доме // Вестник кибернетики. 2026. Т. 25, № 2. С. 60–66. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-6>.

Original article

Possibilities of using hybrid digital twins to solve problem of predictive energy efficient management in apartment building

Ivan V. Poddubnyj[✉], **Svetlana A. Lysenkova**
Surgut State University, Surgut, Russia

Abstract. This article presents the results of measuring microclimate parameters in a residential apartment in a multi-apartment building in the northern region, focusing on carbon dioxide concentrations as the most sensitive indicator of air quality for the human body. The study examines the dynamics of carbon dioxide concentrations, temperature, relative humidity, and pressure under real-life conditions. This study aims to assess the inertia of the residential microclimate, compare measured carbon dioxide levels with current air quality guidelines, and justify the feasibility of using a digital twin to solve the problem of predictive control of a smart home system. The study methodologically uses a measuring device based on an ESP32-C3 Super Mini micro-

controller with AHT20, BMP280, and SCD40 sensors, which generates time series of microclimate parameters. It is shown that during the overnight stay of one person, carbon dioxide concentrations increase monotonically from approximately 1100 cm³/m³ to values above 1800 cm³/m³, exceeding the recommended limits for residential premises. The scientific novelty of this study lies in the experimental substantiation of the fact that the bedroom microclimate can be considered an inertial system, for which the use of predictive control tools for smart home devices based on the predicted dynamics of carbon dioxide is advisable. It is also substantiated that a digital twin integrating sensor data and a room model can proactively detect deteriorating air quality and initiate the most energy-saving control actions.

Keywords: digital twin, apartment microclimate, predictive control, energy efficiency, intelligent control, microclimate sensors

For citation: Poddubnyj I. V., Lysenkova S. A. Possibilities of using hybrid digital twins to solve problem of predictive energy efficient management in apartment building. *Proceedings in Cybernetics*. 2026;25(2):60–66. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2026-2-6>.

ВВЕДЕНИЕ

Качество воздуха в жилых помещениях является важным фактором, определяющим самочувствие, работоспособность, а также качество сна человека. Одним из ключевых индикаторов, позволяющих определить качество воздуха, выступает концентрация углекислого газа, так как она непосредственно связана с дыхательной активностью людей и режимами проветривания либо вентиляции помещений [1]. В ряде нормативных документов, например ГОСТ 30494–2011, приведена классификация воздуха в помещениях. Диапазон содержания CO₂ от 600 до 1 000 см³/м³ считается допустимым, а более высокие значения классифицируются как низкое качество воздуха в помещении. Повышенное содержание CO₂ в помещении ведет к ухудшению общего состояния человека и головной боли, снижению концентрации внимания, росту числа ошибок в работе, а также может вызывать проблемы с дыхательной и кровеносной системами [2].

Важно отметить, что реальные условия эксплуатации квартир, особенно в холодный период года, часто приводят к тому, что окна закрываются для снижения теплопотерь, отопительные приборы частично перекрываются, а приток воздуха практически отсутствует. В таких случаях концентрация углекислого газа ночью может существенно превышать рекомендуемые диапазоны, что редко осознается жильцами, поскольку субъективное

восприятие качества воздуха инерционно и зависит от привычек человека.

В условиях развития концепции применения умных домов и цифровых двойников [3] появляется возможность рассматривать жилую квартиру как управляемую систему, в которой микроклиматические параметры могут не только измеряться, но и прогнозироваться с учетом инерции микроклимата в помещении, а также поведения жильцов. Однако для построения таких моделей необходима экспериментальная база наблюдений, позволяющая выявить характерные закономерности в различных ситуациях. Настоящая работа посвящена анализу динамики концентрации углекислого газа и связанных параметров микроклимата в конкретном помещении, что позволяет обосновать инерционность системы и сформировать требования к предиктивному управлению.

Цель статьи заключается в демонстрации выраженной инерционности микроклимата, что впоследствии обоснует перспективность применения цифрового двойника для упреждающего управления системами вентиляции в умном доме.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование было проведено в жилой комнате в районах Крайнего Севера при низкой наружной температуре – около –15 °С. Отопительный прибор в обследуемой комнате был перекрыт для поддержания комфортной

температуры, а также для поддержания комфортной влажности использовался бытовой увлажнитель воздуха. В ночной период в помещении находился один человек, эпизодически выполнялось проветривание путем открытия окна.

Для регистрации параметров микроклимата было использовано разработанное измерительное устройство на базе микроконтроллера ESP32-C3 Super Mini. В качестве датчиков применена комбинация следующих устройств:

- 1) АНТ20 – для измерения температуры и относительной влажности;
- 2) BMP280 – для измерения атмосферного давления;
- 3) SCD40 – для измерения концентрации углекислого газа.

Схема подключения датчиков к микроконтроллеру приведена на рис. 1.

Датчики и микроконтроллер размещались в едином корпусе, спроектированном в системе трехмерного моделирования КОМПАС-3D и изготовленном с использованием

технологии 3D-печати, что обеспечивало стабильное положение сенсоров и защиту от возможных механических воздействий (рис. 2).

Считывание показаний с датчиков выполнялось с шагом около одной минуты, что позволило получить детальный временной ряд длительностью несколько часов. Для последующего анализа данные были приведены к единой шкале времени в минутах от начала измерений, после чего были построены графики динамики концентрации углекислого газа, температуры, относительной влажности и давления. Дополнительно были вычислены основные статистические характеристики: минимальные, максимальные и средние значения (табл.). Средняя концентрация углекислого газа за период наблюдения составила около $1\,570\text{ см}^3/\text{м}^3$ при минимальном значении $1\,058\text{ см}^3/\text{м}^3$ и максимуме $1\,809\text{ см}^3/\text{м}^3$. Средняя температура воздуха была близка к $26,5\text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность – к 49% ,

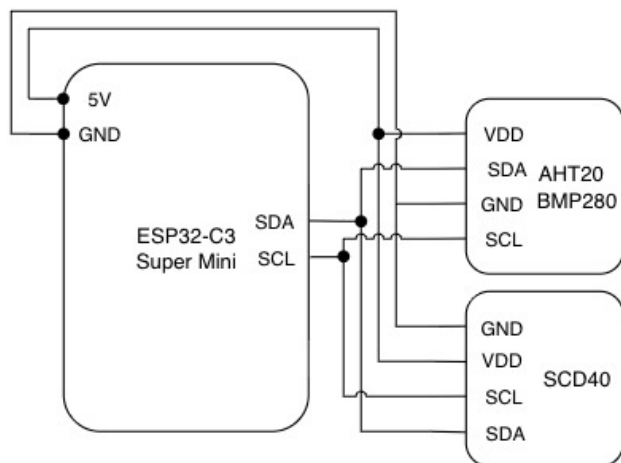


Рис. 1. Схема подключения датчиков к микроконтроллеру

Примечание: составлено авторами.

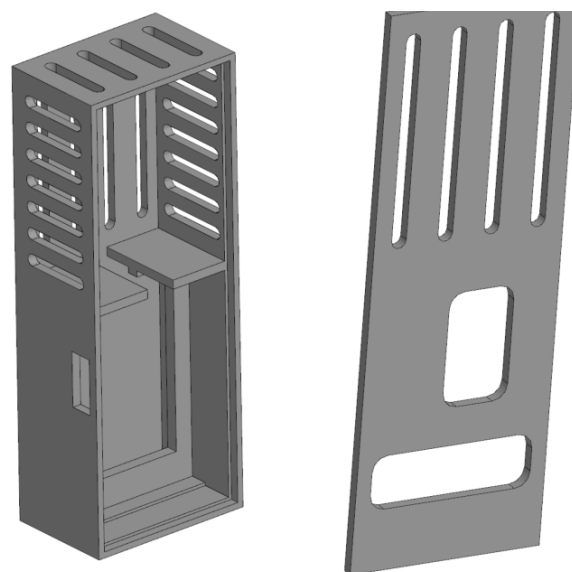


Рис. 2. Корпус для микроконтроллера и датчиков

Примечание: составлено авторами.

Таблица

Статистические характеристики полученных параметров микроклимата

Параметр	Минимум	Максимум	Среднее
CO ₂	1 058	1 809	1 572,75
Температура	26	28,4	26,48
Влажность	30,5	53,1	48,76
Давление	750,3	752,9	751,57

Примечание: составлено на основании данных, полученных в исследовании.

а давление изменялось в узком диапазоне около 752 мм рт. ст. Также выявлены участки с выраженными изменениями параметров, соответствующие, в частности, открытию окна.

Методический анализ строился на сопоставлении полученных значений концентрации углекислого газа с диапазонами, приводимыми в ГОСТ 30494–2011 и профильной литературе по качеству воздуха в жилых помещениях, где уровни до $600 \text{ см}^3/\text{м}^3$ рассматриваются как наиболее предпочтительные, от 600 до $1\,000 \text{ см}^3/\text{м}^3$ – как признак ухудшения качества воздуха и недостаточной вентиляции помещения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений показателей микроклимата в ночной период времени

в жилом помещении показали, что концентрация углекислого газа в спальне в начальный момент наблюдений составляла порядка $1\,100\text{--}1\,150 \text{ см}^3/\text{м}^3$, что уже превышает рекомендуемые для жилых помещений уровни, но еще находится в диапазоне, который часто оценивается как допустимый при кратковременном воздействии. По мере пребывания человека в помещении без значимых притоков наружного воздуха концентрация углекислого газа демонстрирует устойчивый рост и достигает максимальных значений порядка $1\,800\text{--}1\,810 \text{ см}^3/\text{м}^3$. Такой уровень соответствует зоне пониженного качества воздуха, ассоциируемой с повышенной сонливостью, снижением концентрации внимания и субъективным ощущением духоты.

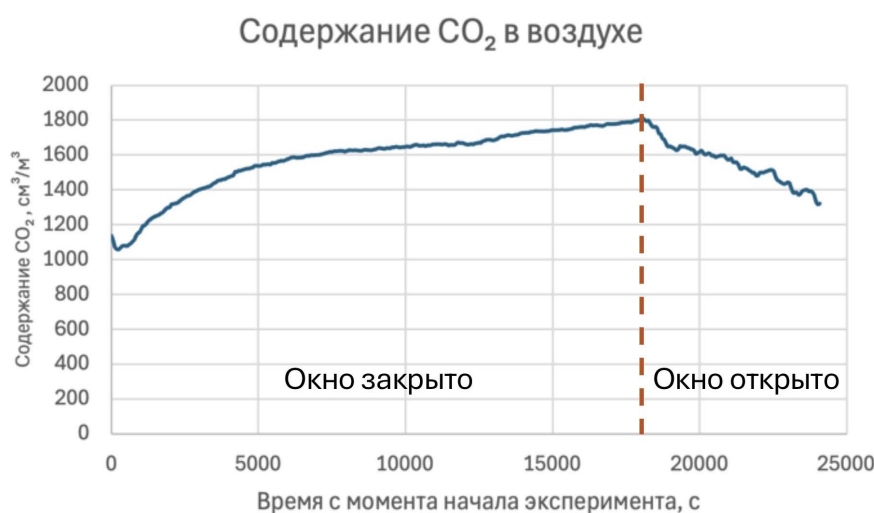


Рис. 3. Динамика концентрации CO₂ в воздухе с отметкой об открытии окна

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Температура воздуха в помещении в течение ночи имеет тенденцию к постепенному снижению с порядка $28,3^\circ\text{C}$ в начале периода до около $26,1\text{--}26,4^\circ\text{C}$ к концу наблюдений (рис. 4). При закрытом отопительном приборе и наружной температуре минус пятнадцать градусов такое поведение отражает естественный тепловой баланс помещения, в котором внутренние источники тепла постепенно уступают влиянию инфильтрации и общему охлаждению помещения. Измерения параметра относительной влажности воздуха показывают рост с около 30–35 % до 50–53 %, что объясняется сочетанием снижения общей

температуры воздуха в помещении, работы бытового увлажнителя воздуха, а также естественным выделением влаги организмом человека. При этом давление изменяется в узком диапазоне и не оказывает заметного влияния на динамику остальных параметров в рассматриваемом масштабе времени.

Полученные результаты позволяют сделать несколько важных выводов. Во-первых, микроклимат жилого помещения в ночное время обладает выраженной инерционностью, которая характеризуется медленным изменением концентрации углекислого газа, температуры и влажности, что создает хорошие условия

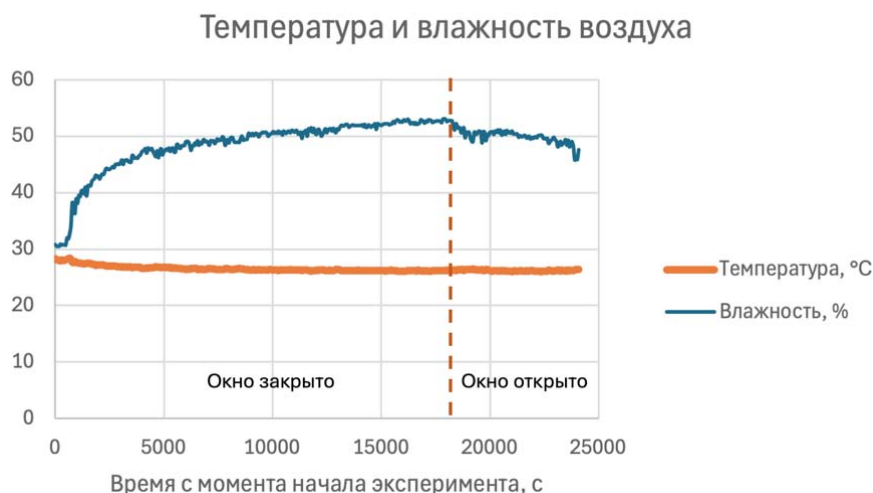


Рис. 4. Динамика температуры воздуха

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

для применения инструментов упреждающего регулирования. Во-вторых, при отсутствии автоматической вентиляции и при закрытых окнах концентрация CO_2 устойчиво выходит за пределы значений, рекомендуемых для жилых помещений, и удерживается в зоне пониженного качества воздуха. В-третьих, эпизодическое ручное проветривание позволяет кратковременно улучшать ситуацию, но не может обеспечить достаточный системный контроль качества воздуха.

С позиции системного управления эти наблюдения свидетельствуют о том, что микроклимат спальни можно рассматривать как динамическую систему с медленными изменениями состояния и относительно предсказуемыми трендами при фиксированных сценариях поведения жильца. В таких условиях применение цифрового двойника, объединяющего физическую модель помещения и данные с датчиков, представляется перспективным инструментом для решения задачи предиктивного управления микроклиматом. Цифровой двойник в данном случае мог бы на основе накопленных измерений и модели воздухообмена [4] заранее прогнозировать рост концентрации углекислого газа и заблаговременно инициировать мероприятия по проветриванию помещения — от открытия окон в рекомендованный момент с уведомлением пользователя до автоматического включения приточной вентиляции, если она предусмотрена.

Важно понимать, что в отличие от условного порогового регулирования, при котором вентиляция включается в момент достижения фиксированного уровня концентрации углекислого газа и ожидает последующего снижения этого параметра, что также является высокоинерционным процессом, предиктивное управление на основе цифрового двойника позволяет учитывать такую высокую инерцию и временную структуру процесса [5]. Допустим, если тенденция роста концентрации CO_2 указывает на достижение $1\,400\text{--}1\,500\text{ см}^3/\text{м}^3$ во время сна, то через определенное время система может запланировать кратковременное проветривание так, чтобы минимизировать тепловые и энергетические потери [6] при сохранении концентрации в пределах рекомендуемых значений. Кроме того, цифровой двойник может адаптироваться к поведению конкретного пользователя, учитывая режим сна, предпочтения по температуре и особенности работы различных устройств изменения микроклимата, таких как увлажнители, осушители и кондиционеры, что в перспективе создает основу для создания персонализированной системы управления микроклиматом жилого помещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование ночной динамики микроклимата в спальне квартиры

с использованием авторского измерительно-го устройства на базе ESP32-C3 Super Mini и датчиков АНТ20, BMP280 и SCD40 показало, что при реальных сценариях эксплуатации концентрация углекислого газа в помещении существенно превышает диапазон, рекомендуемый для жилых помещений, и достигает значений порядка $1\,800\text{ см}^3/\text{м}^3$. Такие результаты делают актуальной задачу не только отслеживания факта превышения показателей углекислого газа в воздухе, но и предиктивного управления системами, которые способствуют улучшению этого параметра микроклимата, например приточной вентиляции [7]. Важно обратить внимание на выявленный факт того, что микроклимат обладает выраженной инерционностью: изменения концентрации CO_2 , температуры и влажности происходят достаточно медленно, что создает хорошие условия для применения инструментов прогнозирования и упреждающего регулирования.

Список источников

1. Рымаров А. Г., Савичев В. В. Особенности определения требуемого воздухообмена в помещениях жилых зданий // *Жилищное строительство*. 2014. № 12. С. 23–25.
2. Мансуров Р. Ш., Гурин М. А., Рубель Е. В. Влияние концентрации углекислого газа на организм человека // *Universum: технические науки*. 2017. № 8.
3. Gopinath V., Srija A., Neethu Sravanthi C. Re-design of smart homes with digital twins // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1228, no. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1228/1/012031>.
4. Дмитриев А. Н., Журавлев Г. С., Верзун В. А. Перспективы разработки цифровых двойников для эксплуатации «умных домов» // *Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании: материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной 113-летию РЭУ им. Г. В. Плеханова*, 08–12 апреля 2020 г., г. Москва / под ред. В. И. Резина. М.: Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, 2020. С. 201–210.
5. Рыбакова Ю. А. Концентрация углекислого газа как критерий эффективности вентиляции // *Вестник магистратуры*. 2020. № 1–3. С. 75–79.
6. Das L., Anand P., Anjum A. et al. The impact of smart homes on energy efficiency and sustainability // *10th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference*

Сформулированный на основе измерений вывод заключается в том, что спальня в многоквартирном доме может быть рассмотрена как инерционная система, для которой наиболее эффективным подходом является именно предиктивное, а не пороговое управление качеством воздуха. Наиболее перспективным направлением дальнейших работ является разработка цифрового двойника помещения, который объединяет модель воздухообмена и статистику измерений параметров микроклимата, а также алгоритмов, позволяющих прогнозировать моменты ухудшения качества воздуха и выбирать наиболее энергосберегающие сценарии работы исполнительных устройств с учетом реального поведения жильцов [8]. В последующих исследованиях целесообразно выполнить серию экспериментов в различных сезонных и эксплуатационных условиях, что позволит уточнить необходимые конфигурации цифрового двойника и повысить эффективность предиктивного управления.

References

1. Rymarov A. G., Savichev V. V. Distinctions of determining of the optimal air exchange in rooms of residential buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo*. 2014;(12):23–25. (In Russ.).
2. Mansurov R., Gurin M., Rubel E. The effect of carbon dioxide concentration on the human body. *Universum*. 2017;(8). (In Russ.).
3. Gopinath V., Srija A., Neethu Sravanthi C. Re-design of smart homes with digital twins. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1228(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1228/1/012031>.
4. Dmitriev A. N., Zhuravlev G. S., Verzun V. A. Perspektivy razrabotki tsifrovyykh dvoynikov dlya ekspluatatsii "umnykh domov". In: V. I. Resin, ed. *Proceedings of the 10th International Research-to-Practice Conference dedicated to the 113th Anniversary of the Plekhanov Russian University of Economics "Sovremennye problemy upravleniya proektami v investitsionno-stroitel'noy sfere i prirodopol'zovanii"*, April 8–12, 2020, Moscow. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics; 2020. p. 201–210. (In Russ.).
5. Rybakova Yu. A. Kontsentratsiya uglekislogo gaza kak kriteriy effektivnosti ventilyatsii. *Vestnik magistratury*. 2020;(1–3):75–79. (In Russ.).
6. Das L., Anand P., Anjum A. et al. The impact of smart homes on energy efficiency and sustainability. In: *10th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference*

on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), December 1–3, 2023, Gautam Buddha Nagar, India. New York, NY : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2023. P. 215–220. <https://doi.org/10.1109/UPCON59197.2023.10434418>.

7. Степанов И. О., Крайнов Д. В. Применение цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 2. С. 26–36.
8. Ukpene P. C., Apaokueze T. N. The impact of smart home technologies on energy efficiency, cost savings, and environmental benefits // Journal of Energy Engineering and Thermodynamics. 2024. Vol. 4. P. 21–32. <https://doi.org/10.55529/jeet.44.21.32>.

Информация об авторах

И. В. Поддубный – аспирант;
<https://orcid.org/0009-0005-2985-0871>,
ivan_poddubnyy01@mail.ru✉

С. А. Лысенкова – кандидат физико-математических наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0003-1007-7610>,
lsa1108@mail.ru

on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), December 1–3, 2023, Gautam Buddha Nagar, India. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2023. p. 215–220. <https://doi.org/10.1109/UPCON59197.2023.10434418>.

7. Stepanov I. O., Kraynov D. V. Application of a digital twin for indoor microclimate monitoring. *News KSUAE*. 2024;(2):26–36. (In Russ.).
8. Ukpene P. C., Apaokueze T. N. The impact of smart home technologies on energy efficiency, cost savings, and environmental benefits. *Journal of Energy Engineering and Thermodynamics*. 2024;4:21–32. <https://doi.org/10.55529/jeet.44.21.32>.

About the authors

I. V. Poddubnyj – Postgraduate;
<https://orcid.org/0009-0005-2985-0871>,
ivan_poddubnyy01@mail.ru✉

S. A. Lysenkova – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;
<https://orcid.org/0000-0003-1007-7610>,
lsa1108@mail.ru