

УДК 621.311:621.313.12:621.548:628.517
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-4-12-19

СОЗДАНИЕ 3D-MODEЛИ ВЕТРЯНЫХ СИСТЕМ С ЛОПАСТЯМИ, НЕ СОЗДАЮЩИМИ ШУМЫ

В.В. Кириллов, З.Д. Сейдакматова, А.Б. Аденов

Аннотация. Приведен сравнительный анализ существующих лопастей классических ветрогенераторов по шумовым показателям, по фрактальной геометрии по эффективности их аэродинамических и механических характеристик. Отмечено, что в классических конструкциях ветродвигателей для лопастей используются различные шумопоглощающие материалы линейной и гладкой формы, что ограничивает их эффективность и долговечность. Предложено использовать 3D-модель с элементами фрактальной геометрии, которые не только снижают, но и возможно полностью устраняют шумовые включения при работе устройства. Разработана 3D-модель лопастей, не создающих шумов. Изготовлен экспериментальный образец конструкции лопастей, проведен практический эксперимент по их использованию, который показал возможность существенно повысить их аэродинамическую эффективность, структурную прочность и общую долговечность, что является перспективным направлением для развития ветроэнергетики.

Ключевые слова: ветрогенератор; лопасти; 3D-модель; фрактальная геометрия; аэродинамика; шумопоглощающие структуры; CFD-анализ.

ЫЗЫ-ЧУУ ЖАРАТПАГАН КАЛАКЧАЛАР АРКЫЛУУ ШАМАЛ СИСТЕМАЛАРЫНЫН 3D МОДЕЛИН ТҮЗҮҮ

В.В. Кириллов, З.Д. Сейдакматова, А.Б. Аденов

Аннотация. Макалада классикалык шамал генераторлорунун учурдагы калакчаларынын ызы-чуу көрсөткүчтөрү боюнча, фракталдык геометрия боюнча алардын аэродинамикалык жана механикалык мүнөздөмөлөрүнүн эффективдүүлүгү боюнча салыштырма талдоосу берилген. Шамал турбиналарынын классикалык конструкцияларында калакчалар үчүн ар кандай сызыктуу жана жылмакай ызы-чууну азайтуучу материалдар колдонулуп, алардын эффективдүүлүгүн жана бышыктыгын чектей тургандыгы белгиленген. Фракталды геометриянын элементтери бар 3D моделин колдонуу сунушталууда, алар аппаратты иштетүүдө ызы-чуунун кошулмаларын азайтып гана тим болбостон, толугу менен жок кылышы мүмкүн. Ызы-чуу жаратпаган калакчалардын 3D модели иштелип чыккан. Калакчалардын конструкциясынын эксперименталдык мисалы даярдалды, аларды пайдалануу боюнча практикалык эксперимент жүргүзүлдү, бул алардын аэродинамикалык эффективдүүлүгүн, структуралык бекемдигин жана жалпы бышыктыгын бир кыйла жогорулатууга мүмкүндүк берип, шамал энергетикасын өнүктүрүүнүн перспективдүү багыты болуп саналат.

Түйүндүү сөздөр: шамал генератору; калакчалар; 3D модели; фракталдык геометрия; аэродинамика; ызы-чууну жутуучу структуралар; CFD талдоосу.

CREATING A 3D MODEL OF WIND SYSTEMS WITH NOISE-FREE BLADES

V.V. Kirillov, Z.D. Seidakmatova, A.B. Adenov

Abstract. The article presents a comparative analysis of the existing blades of classical wind turbines in terms of noise indicators, fractal geometry, and the effectiveness of their aerodynamic and mechanical characteristics. It is noted that in classical designs of wind turbines, various linear and smooth noise-reducing materials are used for blades, which limits their efficiency and durability. It is proposed to use a 3D model with fractal geometry elements, which not only reduce, but also possibly completely eliminate noise inclusions during the operation of the device. A 3D model of noise-free blades has been developed. An experimental design sample of the blades was made, a practical experiment was

conducted on their use, which showed the possibility to significantly increase their aerodynamic efficiency, structural strength and overall durability, which is a promising area for the development of wind energy.

Keywords: wind generator; blades; 3D model; fractal geometry; aerodynamics; noise-absorbing structures; CFD analysis.

В настоящее время проведено большое количество исследований в области аэродинамики лопастей ветрогенерирующих установок, однако остается много нерешенных вопросов в области оптимизации формы лопастей, улучшения их аэродинамических характеристик и снижения шумов при работе ветродвигателя. В этой связи использование фрактальной геометрии представляется наиболее перспективным, поскольку она учитывает множество технических параметров вплоть до определения места установки, что позволяет принимать во внимание сложные структурные особенности и нелинейные эффекты, присущие месту эксплуатации и аэродинамике лопастей.

Анализ мировой практики по использованию конструкций лопастей ветрогенераторов показал, что пока еще нет результатов исследований лопастей с применением фрактальной геометрии по снижению уровня шума, по улучшению их аэродинамических и механических характеристик. В классических конструкциях лопастей ветрогенераторов используются линейные и гладкие формы, что ограничивает их эффективность и долговечность. Изучение возможностей использования фрактальных элементов в дизайне лопастей показало пути для повышения их производительности и надежности.

Внедрение фрактальной геометрии в проектировании лопастей ветрогенераторов может существенно повысить их аэродинамическую эффективность, структурную прочность и общую долговечность, что является перспективным направлением для развития ветроэнергетики.

По прогнозам специалистов, к 2030 году мировая потребность в электроэнергии возрастет в несколько раз и достигнет 44 млрд тонн условного топлива в год. Такое безудержное развитие энергетики будет все более пагубно воздействовать на окружающую среду и может стать одной из причин необратимого изменения климата. Поэтому использование альтернативных, или возобновляемых источников энергии – значительно более чистых с экологической точки зрения, чем объекты традиционной энергетики – поможет частично решить эту проблему.

В настоящее время энергетика Кыргызстана в основном базируется на использовании традиционных источников энергии. Это, прежде всего, газ, нефть, уголь, сланцы. Одним из эффективных путей преобразования топливно-энергетических ресурсов является использование экологически чистых нетрадиционных возобновляемых источников энергии (энергия солнца, ветра, прилива морей и т. п.). Использование возобновляемых источников в общем производстве энергии в республике пока еще остается крайне незначительным (за исключением использования энергии течения рек на гидростанциях). Это обусловлено рядом недостатков, присущих большинству альтернативных источников энергии и препятствующих их широкому распространению: цикличность, малая удельная мощность, высокая стоимость оборудования для преобразования энергии.

Предложено решение одной из задач по определению оптимального места для установки ветряных электростанций на основе сравнения географических, метеорологических и эксплуатационных данных с целью выявления районов с наиболее подходящими условиями для утилизации потока ветровой энергии. В качестве примера рассмотрена работа большой ветроустановки, которая находится в Фуцзяньском морском ветропарке в Тайваньском проливе (рисунок 1).

Выбор высоты башни ветрогенератора зависит от потребляемой мощности, нагрузки и рельефа местности, силы ветряного потока, с которой он взаимодействует. Высота башни выбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальную скорость ветра на уровне лопастей [1].

Выбор существующих систем шумоподавления в динамике механизмов осуществляется с помощью различных технологий и устройств, направленных на снижение уровня шума, создаваемого во время работы механизмов. В основном это основано на применении звукопоглощающих материалов, способных поглощать звуковые волны от обшивки лопастей и оборудования механизмов, что помогает



Рисунок 1 – Фуцзяньский морской ветропарк в Тайваньском проливе, где проявляется эффект естественной аэродинамической трубы

снизить уровень шума, создаваемого работающими ветроэнергетическими установками [2]. В качестве звукопоглощающих материалов, которые обладают высокой способностью к поглощению звуковых волн, применяются пористые, волокнистые, специальные акустические панели или покрытия.

Пористые или многослойные материалы способны эффективно поглощать звук при работе ветроэнергетической установки [3]. Возможно применение таких материалов, как пористый бетон, стекловолокно, минеральная вата, пенопласт и т. д., а также многослойных композитных материалов с различными поглощающими слоями. На основе выбранных материалов разрабатывается конструкция, которая обеспечивает максимальное поглощение шумов с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду и близлежащие населенные территории [4]. Применение амортизирующих элементов, таких как виброизоляторы и амортизирующие подшипники, играет существенную роль в снижении передачи вибраций и звуковых колебаний в системах ветроэнергетики. Применяются виброизоляторы различного типа (пневматические, пружинные, гидравлические и т. д.) и амортизирующие подшипники.

Для активного понижения уровня шума возможно создание компенсационных сигналов. При исследованиях материалов для активного понижения уровня шума проводится сбор акустических данных с помощью микрофонов и динамиков, установленных вблизи источников шума, например, на лопастях ветрогенератора или недалеко от него. Полученные данные от микрофонов подаются на центральный компьютер или контроллер. Сравнивается и анализируется уровень шума и определяются необходимые для шумопонижения компенсационные сигналы [5].

Алгоритмы обработки сигналов используются для определения ключевых характеристик шума, таких как амплитуда, частота, фаза и временные параметры. Это позволяет определить основные компоненты шума и его спектральные особенности [6]. Система генерации антинправленных звуковых волн определяет параметры компенсационных сигналов и генерирует антинправленные звуковые волны с использованием динамиков, расположенных на соответствующих участках ветрогенератора или недалеко от него. Генерируемые сигналы соответствуют параметрам, определенным алгоритмами обработанных сигналов. В работе системы происходит стабилизация обратной связи с микрофонами

мониторинга эффективности компенсации шума. Алгоритмы обработки сигналов используют данные для корректировки параметров компенсации в реальном времени, чтобы обеспечить максимальную эффективность подавления шума.

Применение алгоритмов обработки сигналов для оптимальной настройки системы подавления шума в ветроэнергетике позволяет обеспечить максимальную эффективность компенсации шума при минимальных затратах энергии и ресурсов.

Решаются задачи разработки механизмов с учетом уменьшения трения и вибрации, что также способствует снижению уровня шума в ветроэнергетике [7]. Сравнение конструкций и работы механизмов, а также моделирование их поведения с учетом различных факторов, включая механическую нагрузку, динамику вращения, тепловые эффекты, также способствуют разработке лопастей с минимальным шумовым эффектом.

Другим путем снижения шума является оптимизация конструкции с целью уменьшения трения таких параметров механизмов как форма и размеры деталей, применение новых материалов с улучшенными механическими свойствами, модернизированными смазочными материалами и конструкции подшипников [8].

В разработке механизмов применяются специальные антивибрационные технологии и материалы, которые способствуют снижению вибрации и уменьшению шума. Используются бесшумные подшипники, антивибрационные материалы, специальные конструкции для поглощения и диссипации вибрации и т. д. [9]. Проводится тестирование механизмов на стендах или в реальных условиях эксплуатации для проверки их работы и эффективности снижения трения, вибрации и шума. Применение современных методов и технологий в разработке механизмов с учетом уменьшения трения и вибрации играет важную роль в снижении уровня шума в ветроэнергетике. При сравнении определяются формы профиля элементов ветроустановки, лопасти ветрогенератора, изменение формы конструкции, профиля сечения лопастей, угла поворота и т. д.

На снижение уровня шума также возможно оказывают влияние и аэродинамические характеристики лопастей. Использование современных аэродинамических методов и компьютерного моделирования элементов ветроустановки позволит разработать такую конструкцию лопастей, которая позволит снизить потери энергии на турбулентность [10].

Для снижения уровня шума также решается задача использования звуковых барьеров с определением места установки звукопоглощающих или отражающих барьеров. В зависимости от характеристик источника шума и условий окружающей среды выбирают тип звукопоглощающих или отражающих барьеров и определяют их размеры и форму [11].

Моделирование и симуляция вибраций и звуковых колебаний, цель которых оптимизация конструкции, определяет выбор подходящего программного обеспечения, способного проводить моделирование и симуляцию вибраций и звуковых колебаний. Эту задачу способны решить такие программы, как ANSYS Mechanical, Abaqus, COMSOL Multiphysics и другие. Эти программы создают трехмерную модель ветрогенератора или его отдельных компонентов, включая лопасти, башню, генератор и другие механизмы. Модель учитывает основные параметры конструкции и материалов. При создании модели определяются граничные условия, такие как сила ветра, механические нагрузки, частота вращения и другие параметры, которые влияют на вибрацию и звуковые колебания [12]. Программное обеспечение рассчитывает предварительное тестирование с использованием виртуальных сред позволяет решить проблемы еще на ранних стадиях разработки, что способствует повышению надежности и эффективности работы ветроустановок и снижению рисков при их эксплуатации.

Необходимо также решить задачу разработки систем управления, способных мониторить уровень шума в реальном времени и автоматически регулировать параметры минимизации шумовых колебаний при работе ветроустановки. Для этого собираются данные о шуме, который создает ветроустановка с использованием специальных акустических датчиков или микрофонов, установленных на различных расстояниях от источника шума. Полученные параметры сравниваются с пороговыми значениями

при помощи алгоритмов обработки сигналов для определения пороговых значений уровня шума, превышение которых подлежат корректировке для его снижения. На основе сравнения данных разрабатывают алгоритмы управления, способные автоматически регулировать работу ветроустановки для минимизации шумовых колебаний. Эти алгоритмы регулируют изменение частоты вращения ротора, угла поворота лопастей, направления ветра и другие параметры. Разработанные алгоритмы управления интегрируют с системой управления ветроустановкой или группой ветроустановок одновременно, или распределенной системой управления автономными ветроустановками. Разработанная система управления работает в реальном времени, мониторя уровень шума и автоматически регулирует работу ветроустановки для минимизации шума.

Система также предоставляет обратную связь эффективности управления шумом. Разработка системы управления способна мониторить уровень шума и автоматически регулировать параметры для минимизации шумовых колебаний для близлежащих жилых зон и рабочих объектов. Применение инновационных технологий, таких как пьезоэлектрические материалы, магнитореологические жидкости и другие, позволят разработать эффективную систему шумоподавления в ветроустановке. Пьезоэлектрические материалы преобразуют механическую энергию, такую как вибрации, в электрическую энергию [9]. Это позволяет использовать их для создания систем, способных подавлять вибрации и шум в ветроустановках, а также генерировать электроэнергию для внутренних нужд самой системы шумоподавления: Пьезоэлектрические материалы могут быть интегрированы в активные системы шумоподавления, которые используют обратную связь для создания противофазовых звуковых волн для подавления шума, генерируемого ветроустановкой. Магнитореологические жидкости изменяют свою вязкость под воздействием магнитного поля. Они могут использоваться для создания амортизационных систем, способных снижать вибрации и звуковые колебания в механических элементах ветроустановки.

Для решения задачи разработки модернизированного механизма и создания 3D-модели необходимо использовать и теоретические положения аэродинамики. Уравнение Навье–Стокса описывает движение жидкости или газа и является основой для моделирования турбулентности и обтекания тел. Уравнения Навье–Стокса являются системой дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкости или газа. В общем виде это уравнение для несжимаемой однородной жидкости записывается следующим образом:

$$\partial \mathbf{v} / \partial t + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = - (1/\rho) \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v}, \quad (1)$$

где $\mathbf{v}$ – вектор скорости жидкости; t – время; ρ – плотность жидкости; ν – кинематическая вязкость жидкости; ∇ – оператор градиента; ∇^2 – оператор Лапласа.

Оператор градиента, обозначаемый символом ∇ , является важным математическим оператором, используемым в векторном анализе и дифференциальном исчислении. Он обозначает векторную производную по координатам пространства. В декартовых координатах оператор градиента выглядит следующим образом:

$$\nabla = (\partial/\partial x) \mathbf{i} + (\partial/\partial y) \mathbf{j} + (\partial/\partial z) \mathbf{k}, \quad (2)$$

где $\partial/\partial x$, $\partial/\partial y$, $\partial/\partial z$ – частные производные по соответствующим координатам; $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$ и $\mathbf{k}$ – единичные векторы по направлениям осей x , y и z соответственно.

Оператор Лапласа – это оператор, обозначаемый символом ∇^2 , который является второй векторной производной от функции по координатам. В декартовых координатах оператор Лапласа определяется как сумма вторых частных производных по каждой из координат:

$$\nabla^2 = (\partial^2/\partial x^2) + (\partial^2/\partial y^2) + (\partial^2/\partial z^2). \quad (3)$$

В сферических координатах оператор Лапласа выражается следующим образом:

$$\nabla^2 = \left(1/r^2\right)(\partial/\partial r)(r^2 \partial/\partial r) + \left(1/(r^2 \sin(\theta))\right)(\partial/\partial \theta)(\sin(\theta) \partial/\partial \theta) + \left(1/(r^2 \sin^2(\theta))\right)(\partial^2/\partial \varphi^2), \quad (4)$$

где r – радиальная координата; θ – полярный угол; φ – азимутальный угол.

Оператор Лапласа широко используется в математической физике и инженерии для описания различных физических явлений, таких как теплопроводность, распространение звука, электромагнитные поля и другие. В уравнении Навье–Стокса оператор Лапласа обычно отвечает за вязкое трение и диффузию вещества в жидкости или газе. Оператор градиента применяется для вычисления направления и скорости наибольшего увеличения функции в точке. В контексте уравнения Навье–Стокса оператор градиента используется для описания изменения вектора скорости (или других величин) в пространстве и времени. Это уравнение описывает изменение скорости жидкости в пространстве и времени под действием вязкости и внешних сил (давления). Это уравнение представляет собой фундаментальную основу в области гидродинамики и аэродинамики и его используют в моделировании и сравнении различных течений жидкости и газа.

Уравнение Бернулли описывает сохранение энергии в идеальной несжимаемой жидкости и используется для сравнения потока воздуха вокруг аэродинамических поверхностей несжимаемого и не вязкого потока жидкости:

$$P + 1/2 \rho v^2 + \rho gh = \text{const} . \quad (5)$$

В уравнении учитываются три вида энергии: давление (P), кинетическая энергия $1/2 \rho v^2$, где ρ – плотность жидкости; p – давление; v – скорость потока) и потенциальная энергия ($\rho g h$, где g – ускорение свободного падения; h – высота над некоторой отметкой). Эти три энергии суммируются вдоль потока и остаются постоянными вдоль его траектории при условии, что поток несжимаемый и не вязкий, а также отсутствуют внешние силы, такие как трение. Уравнение Бернулли находит широкое применение в гидротехнике, аэродинамике, а также в других областях, связанных с потоками жидкости и газов.

Уравнение потока описывает поток жидкости или газа через заданную геометрию и его используют для определения распределения скорости и давления вдоль лопасти ветра генератора.

Уравнение Нарагана–Шмитта описывает турбулентное течение и используется для моделирования турбулентности на поверхности лопасти. Оно же известно как уравнение Навье–Стокса в трехмерной форме и записывается следующим образом:

$$\partial u/\partial t + (u \nabla) u = -1/\rho \nabla p + \nu \nabla^2 u + f , \quad (6)$$

где u – вектор скорости потока; p – давление; ρ – плотность жидкости; ν – кинематическая вязкость; f – внешняя сила на единицу массы; ∇ – оператор градиента; $\partial/\partial t$ – частная производная по времени;

∇^2 – оператор Лапласа.

Уравнение Кутты–Жуковского описывает потенциальный поток жидкости вокруг аэродинамического профиля и может использоваться для сравнения подъемной силы и сопротивления. Механизмы передачи звука от источника в окружающую среду. Идентификация путей распространения звука и оценка их влияния. За основу взяты теоретические модели прикладной физики [9]: Оценка характеристик материалов. Сравнения материалов, используемых в стационарных элементах, с их звукопоглощающими и изолирующими свойствами [4]. Выбор материалов с учетом снижения рефлексии и поглощения звука. Моделирование динамических элементов на предмет возникновения шума. Представлены основные этапы моделирования динамических элементов для оценки шумовых характеристик:



Рисунок 2 – Модель 1. Внешний вид трёхмерной модели трёхлопастного ветряка

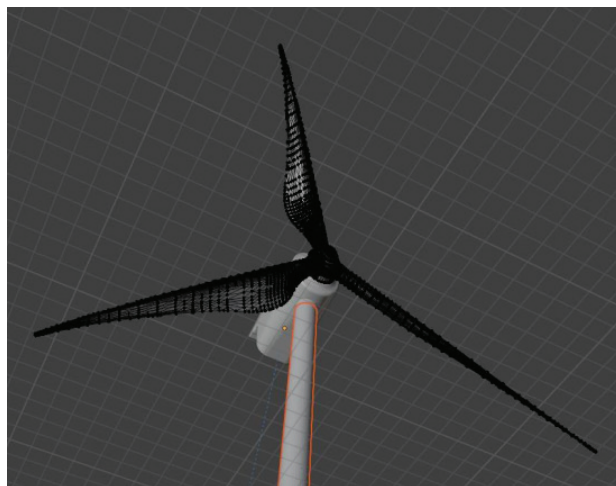


Рисунок 3 – Модель 2. Трёхлопастной ветряк с противошумовой защитой

сбор данных и характеристик. Получение данных о динамических свойствах материалов, из которых изготовлены элементы [10]. Моделирование механической динамики: Использование программного обеспечения для механического моделирования (например, Finite Element Analysis – FEA) для создания внешнего вид трёхмерных моделей элементов (рисунок 2).

Выбор типа генератора зависит от требований к потребляемой мощности нагрузки, эффективности и надёжности ветрогенератора, а также от экономических и технических факторов. Типы генераторов, асинхронные или синхронные генераторы, используют в зависимости от условий проекта.

На рисунке 3 представлена модель трёхлопастного ветряка с противошумовой защитой. Это результат проектирования и тестирования определения основных параметров конструкции деталей ветрогенератора с помощью проведения компьютерного моделирования и тестирования прототипов. Этот этап позволяет убедиться в работоспособности конструкции и оптимизировать ее параметры.

Поступила: 20.02.2025; рецензирована: 06.03.2025; принята: 10.03.2025.

Литература

1. В 2024 году финансирование энергосектора увеличится вдвое / Минфин КР. URL: <https://bulak.kg/2024/02/05/v-2024-godu-finansirovanieenergosektora-uvelichitsya-vdvoe-minfin-kr/> (дата обращения: 05.02.2024).
2. The Future of Energy Storage // An Interdisciplinary MIT Study. URL: <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2022/05/The-Future-of-EnergyStorage.pdf> (дата обращения: 06.02.2024).
3. Официальный сайт компании Энерджи Винд. URL: <https://energywind.ru/> (дата обращения: 07.02.2024).

4. Bio-Based Flame-retardant Technology for Polymeric Materials / Yuan Hu, Xin Wang, Hafezeh Nabipour // Copyright © 2022 Elsevier Inc. All rights reserved. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323907712/biobased-flame-retardant-technology-for-polymeric-materials> (дата обращения: 06.02.2024).
5. Land-based wind turbines with flexible rail-transportable blades. Part 1. Conceptual design and aeroservoelastic performance / Pietro Bortolotti¹, Nick Johnson, Nikhar J. Abbas, Evan Anderson, Ernesto Camarena, and Joshua Paquette // Wind Energ. Sci., 6, 1277–1290, 2021. URL: <https://doi.org/10.5194/wes-6-1277-2021> © Author(s) 2021. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. (дата обращения: 15.11.2023).
6. Unfurling The Waste Problem Caused By Wind Energy. URL: <https://www.npr.org/2019/09/10/759376113/unfurling-the-waste-problem-caused-by-wind-energy> (дата обращения: 19.09.2022).
7. The Future of Energy Storage / An Interdisciplinary MIT Study. URL: <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2022/05/The-Future-of-Energy-Storage.pdf> (дата обращения: 06.02.2024).
8. Простейшая ветроэлектростанция КД–2. М.: Изд-во ДОСАРМ, 1949 (дата обращения: 06.02.2024).
9. Фейнмановские лекции по физике. Том 2. Излучение. Волны. Кванты. Кинетика. Теплота. Звук. М.: Изд-во АСТ, 2021.
10. Карбон для лопастей ветрогенераторов. URL: <https://comcarbo.ru/news/karbon-dlya-lopastej-vetrogeneratorov/> (дата обращения: 06.02.2024).
11. Аубакиров Р.Д. Пример расчета параметров ветроэнергетической установки для потребителя малой мощности / Р.Д. Аубакиров, А.О. Вирайло, Е.В. Гаврилович. Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2016. № 28.2 (132.2). С. 1–7. URL: <https://moluch.ru/archive/132/36967/> (дата обращения: 18.06.2024).