

**ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ,
ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИХ И ТВОРЧЕСКИХ РАБОТ ОБУЧАЮЩИХСЯ
«НАУКА, ТВОРЧЕСТВО, ДУХОВНОСТЬ»**

Направление: химия

Тема: Модульный конструктор MOFs

Соискатель: Мишарина Елизавета Евгеньевна

Научный руководитель: Байч Елена Юрьевна

Место выполнения работы: Свердловская область, г. Серов

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| Глава 1 | 5 |
| 1.1. Связь неорганической и органической химии через металлоорганические соединения. | 5 |
| 1.2. Историческое развитие и общие характеристики металлоорганических соединений. | 6 |
| 1.3. Основное направление, где MOF уже совершают прорыв. | 7 |
| 1.4. Синтез, свойства и уникальные преимущества металлоорганических каркасов. | 8 |
| 1.5. Биомедицинское применение MOFs: доставка лекарств и терапевтические функции. | 9 |
| Глава 2 | 11 |
| 2.1. Определение качеств модели MOFs. | 11 |
| 2.2. Разбор строения для определения составляющих конструктора..... | 12 |
| 2.3. 3D моделирование конструктора. | 12 |
| 2.4. 3D печать. | 12 |
| 2.5. Разработка пособия по использованию конструктора..... | 13 |
| 2.6. Создание канала в социальной сети «ВКонтакте»..... | 13 |
| Заключение..... | 14 |
| Список используемых источников | 15 |
| Приложения | 17 |
| Приложение 1. Результаты онлайн опроса обучающихся старших классов. | 17 |
| Приложение 2. Интервью с Баскаковой Светланой Анатольевной..... | 19 |
| Приложение 3. Интервью с Головачевым Иваном Борисовичем. | 20 |
| Приложение 4. Дополнительные комментарии от специалистов в области химии. | 21 |
| Приложение 5. Вариации разделения конструктора на составляющие. | 22 |
| Приложение 6..... | 23 |
| 6.1. Процесс 3D моделирования | 23 |
| 6.2. Сравнение старого и нового размера линкера в Blender. | 23 |
| 6.3. 3D печать..... | 24 |
| 6.4. Процесс сборки и покраски модели. | 24 |
| 6.5. VK сообщество | 25 |

Введение

Металлоорганические каркасы (MOFs) — это кристаллические пористые материалы, состоящие из ионов металлов, соединенных органическими молекулами (лигандами)¹. [9]

Долгое время считалось, что в подобных структурах в наше время совершенно нет необходимости, что существует множество более удобных для использования аналогов. Но, буквально, 8 октября 2025 года трое химиков (Сусуму Китагава (Япония), Ричард Робсон (Австралия) и Омар М. Яги (США)) получили Нобелевскую премию за разработку этих самых MOFs. [17]

Новизна их открытия заключалась в том, что они открыли уникальные материалы с огромной областью применения и управляемой структурой. Сегодня эти материалы используются для хранения и разделения газов, улавливания CO₂, очистки воды, катализа, энергетики и биомедицины.

Представьте себе, что вы самостоятельно смогли смоделировать подобную структуру с необычными свойствами: контроль над размерами, составом и селективностью вашего творения можно осуществить посредством различных технологий, но, главным преимуществом своей структуры, вы сделали возможность поглощать атомы или даже молекулы других веществ, храня их в самом каркасе, как в некоей клетке.

Подобной структуре будет подвластно множество областей нашей жизни: она сможет доставлять лекарства так, что необходимые полезные вещества будут начинать воздействовать на организм только когда окажутся в нужном месте, кроме того, каркас поможет в очистке водоемов, забирая в себя атомы загрязняющих веществ, он будет блокировать их воздействие и оседать на дно. Можно сказать, что его области применения могут ограничиваться только человеческой фантазией и технологическими возможностями нашего времени. [9]

Один из способов, чтобы MOFs, которые, как мне кажется, уже стоят на пороге массового использования, стали более понятны аудитории юных химиков — это предоставить возможность, через структурные модели молекул, увидеть свойства и возможности каркасов.

Цель: создание конструктора моделей молекул металлоорганических каркасов для изучения химии и смежных наук.

Гипотеза: разработка конструктора, позволяющего создавать модели металлоорганических каркасов, облегчит изучение материала на уроках химии, во внеурочной деятельности и позволит сделать процесс обучения более увлекательным и визуализированным.

Задачи проекта:

1. Изучить MOFs и их свойства.
2. Провести онлайн анкетирование “А знаете ли вы о MOFs в нашей жизни?” среди обучающихся MAOY COШ 15 и преподавателей/специалистов в области химии.
3. Провести интервью с преподавателями химии.

¹ Лиганд (в координационной химии) – атом, ион или молекула, которая выступает донором электронной пары, образуя координационную связь с центральным атомом (чаще всего металлом).

4. Проанализировать строение каркасов для создания конструктора.
5. Создать 3D модель для первого конструктора и распечатать её на 3D принтере.
6. Составить учебное пособие по пользованию конструктором.
7. Создать вспомогательный канала в социальной сети «ВКонтакте» для изучения материала по MOFs.

Объект исследования: устройство химической решётки

Предмет исследования: устройства кристаллической решетки металлоорганических каркасов

Методы исследования:

1. теоретические: изучение литературы, работа с Интернетом
2. эмпирические: сбор и анализ данных, анкетирование, интервью
3. практические: создание 3D модели, разработка пособия, создание канала в социальной сети «ВКонтакте».

Глава 1

1.1. Связь неорганической и органической химии через металлоорганические соединения.

Современная химическая наука поражает количеством разнообразных разделов, которые входят в ее состав. Но одними из основных разделов по-прежнему остаются неорганическая и органическая химии. Если органическая химия всецело посвящена уникальному миру соединений углерода, который включает в себя всё многообразие органической жизни, от простейших молекул до сложных полимеров ДНК и белков. В противоположность этому, неорганическая химия исследует свойства, строение и реакции всех остальных химических элементов периодической системы и их соединений, не содержащих углеродных цепочек.

Эти две дисциплины развивались параллельно и между ними пролегла четкая концептуальная граница. Долгое время органическая и неорганическая химия никак не были связаны между собой, однако научный прогресс смог так и связать эти две области одной науки, что и представляет собой металлоорганическая химия.

Её ключевым понятием является металлоорганические соединения характеризуются наличием прямой химической связи между атомом металла (например, железа, цинка, магния, палладия) и атомом углерода, входящего в состав органического фрагмента. Эта связь, зачастую ковалентная или координационная², является тем самым «мостом», который соединяет «неорганический» металл с «органическим» углеродным скелетом. Таким образом, в одной молекуле сочетаются свойства, характерные для ионов металлов (способность к окислению-восстановлению, образование координационных сфер), и реакционная способность органических групп. [10]

Сфера интересов этой науки ещё шире: она часто включает изучение соединений, где углерод связан не только с типичными металлами, но и с такими элементами, как бор (B), кремний (Si), германий (Ge), олово (Sn), свинец (Pb), фосфор (P), мышьяк (As) и сурьма (Sb). Эти элементы, занимающие промежуточное положение между металлами и неметаллами, также образуют с углеродом прочные связи, что привело к появлению более общего и точного термина — элементорганическая химия. [9]

Возникновение этой дисциплины стёрло четкую грань между двумя крупнейшими разделами химии, доказав их глубокую взаимосвязь. Металлоорганические соединения стали не просто, а мощным инструментом для создания новых технологий — от высокоэффективных катализаторов, без которых немыслима современная промышленность органического синтеза, до передовых материалов и инновационных фармацевтических препаратов. [13]

² Координационная связь – связь, образующаяся по донорно-акцепторному механизму, когда лиганд предоставляет пару электронов (донор), а ион металла её принимает (акцептор). Ключевой тип связи в комплексах.

1.2. Историческое развитие и общие характеристики металлоорганических соединений.

История металлоорганических соединений насчитывает несколько столетий. Одним из первых известных примеров стала «дымящая жидкость Кадэ», описанная французским фармацевтом Луи Клодом Каде де Гассикуром в 1758 году. [8]

Позже было установлено, что это вещество, оксид какодила³, содержит связь мышьяк-углерод (As–C). В XX веке соединения мышьяка нашли применение в медицине в качестве малотоксичных тонизирующих средств и препаратов для лечения сифилиса (сальварсан⁴). После этого область металлоорганической химии пережила бурный рост. Были синтезированы тысячи соединений, нашедших применение в катализе, аналитической химии и фармакологии.

Но настоящая революция случилась, когда металлоорганические соединения вышли из лабораторий в промышленность. Они стали основой для катализаторов, изменивших мир. Процессы Циглера-Натта позволили создавать пластмассы в промышленных масштабах, а реакции кросс-сочетания на комплексах палладия и других металлов совершили переворот в органическом синтезе, особенно в фармацевтике. [2]

С конца XX века началась эра диверсификации и прецизионного дизайна. Металлоорганическая химия породила новые функциональные материалы: люминесцентные комплексы для дисплеев, молекулярные магниты и сенсоры. Появилась и бурно развивается химия металлоорганических каркасов — высокопористых материалов для хранения газов, сепарации и биомедицины. [6]

Есть три значимые личности, которые сделали наибольший вклад в «новый взгляд» на металлоорганические соединения, и первым из них является Омар Яги (Omar Yaghi) — США/Иордания, именно он считается "отцом" современной химии MOF. Именно его группа в 1995 году ввела термин "MOF" и в 1999 году синтезировала MOF-5 — один из первых и самых знаменитых каркасов с рекордной площадью поверхности. Он же позже создал и родственные COF⁵. Вторым же учёным, который продолжил изучение MOFs, является Сусуму Китагава (Susumu Kitagawa) — Япония. Независимо и почти одновременно с Яги, в 1997 году его группа сообщила о похожих пористых координационных полимерах, которые проявляли интересные свойства при адсорбции газов. А последним стал Джеффри Лонг (Jeffrey R. Long) — США. Его группа сосредоточилась на создании MOF для хранения водорода и метана, а также для улавливания газов. [7], [12]

³ Оксид какодила – раннее металлоорганическое (точнее, элементоорганическое) соединение мышьяка $[(\text{CH}_3)_2\text{As}]_2\text{O}$, известное как «дымящая жидкость Кадэ». Исторически один из первых известных примеров связи углерод-мышьяк.

⁴ Сальварсан – первое эффективное химиотерапевтическое лекарственное средство (содержащее мышьяк), применявшееся для лечения сифилиса в начале XX века. Является элементоорганическим соединением.

⁵ COF (ковалентные органические каркасы) — термин в химии, который означает класс пористых материалов, состоящих из органических соединений, связанных ковалентными связями. Такие каркасы образуют двух- или трёхмерные структуры в результате реакций между органическими предшественниками.

Сегодня металлоорганическая химия — это междисциплинарная область, тесно связанная с нанотехнологиями, вычислительным моделированием и биологией. Её главные задачи — создание селективных катализаторов на основе доступных металлов, дизайн «умных» материалов для медицины и энергетики, а также разработка устойчивых и экологичных технологий. Из академической науки она превратилась в мощный инструмент для решения практических задач современности. [4]

1.3. Основное направление, где MOF уже совершают прорыв.

Самым многообещающим обещает быть направление развития металлоорганических каркасов в сторону хранения и разделения газов:

- 1) Транспортировка водорода: Водород — это чистый источник энергии, но его крайне сложно хранить (нужны тяжелые баллоны под высоким давлением или сложное охлаждение). MOF, как молекулярная губка, могут безопасно и плотно адсорбировать огромное количество водорода при более мягких условиях.
- 2) Природный газ (метан) для транспорта: Установки с MOF позволяют заправлять автомобили природным газом при более низком давлении, увеличивая запас хода и безопасность.
- 3) Улавливание углекислого газа (CO₂): Это — "золотая жила" для MOF. Можно создать каркасы с порами, которые селективно "выхватывают" молекулы CO₂ из дымовых газов электростанций или даже прямо из атмосферы (технология DAC — Direct Air Capture⁶). Это мощнейший инструмент в борьбе с изменением климата.

Кроме того, MOF можно использовать как "нанореакторы". Их огромная площадь и возможность встроить в поры каталитически активные центры (например, частицы благородных металлов) позволяют проводить химические реакции с высокой эффективностью и селективностью, экономя дорогие катализаторы. [3]

Несмотря на фантастический потенциал, остаются задачи для массового внедрения:

- 1) Масштабирование синтеза: Производство тонн MOF (а не граммов в лаборатории) с сохранением качества и низкой себестоимостью.
- 2) Стабильность: Некоторые MOF чувствительны к влаге. Ведутся работы по созданию гидролитически стабильных каркасов (например, на основе циркония или железа).
- 3) Вторичная переработка: Разработка "зеленых" методов утилизации и регенерации MOF. [16]

⁶ DAC (Direct Air Capture) — технология прямого улавливания углекислого газа (CO₂) из атмосферы. Идея — построить установки, которые будут действовать как гигантские атмосферные фильтры: засасывать воздух, извлекать из него CO₂ и «упаковывать» его в безопасное хранилище.

1.4. Синтез, свойства и уникальные преимущества металлоорганических каркасов.

Ключевой особенностью и преимуществом металлоорганических каркасов является то, что их структурные параметры не заданы раз и навсегда, а могут быть точно спроектированы и синтезированы «под задачу». Это достигается выбором методики получения, которая определяет размер, морфологию и чистоту конечных кристаллов.

Ключевые методы синтеза включают:

1) Сольво-/Гидротермальный синтез: протекает в герметичных автоклавах при повышенных температуре и давлении, позволяя получать высококачественные монокристаллы;

2) Микроволновой синтез: обеспечивает быстрое и равномерное нагревание, сокращая время реакции с дней до часов или минут и давая нанокристаллы;

3) Механохимический синтез: проводится путем измельчения твердых реагентов без растворителя — простой и «зеленый» метод;

4) Электрохимический синтез: позволяет тонко контролировать процесс за счет подачи тока, часто используется для нанесения MOFs-покрытий на поверхности;

5) Метод медленного испарения: самый простой подход, при котором кристаллы растут из раствора при комнатной температуре в течение недель.

Главное следствие такой контролируемой сборки, в первую очередь, это — рекордная внутренняя пористость, достигающая 90% от объема материала. Это не просто пустое пространство; это упорядоченная система нанопор и каналов с четкой геометрией. Меняя между коннекторами⁷ органический линкер⁸ (например, удлиняя его или добавляя функциональные группы), можно точно настраивать размер и химическую среду этих пор, создавая «молекулярные сита» или «ловушки» для конкретных молекул. [11]

Именно эти свойства делают MOFs принципиально иной платформой по сравнению с классическими носителями. Часто под «классическими носителями» подразумевается:

1) Полимерные частицы и липосомы: часто имеют аморфную, плохо контролируемую структуру, что приводит к неравномерному и быстрому высвобождению лекарства;

2) Неорганические наночастицы (оксиды, металлы): могут обладать нежелательной токсичностью и накапливаться в органах, а также склонны к агрегации (слипанию);

⁷ Коннектор – ион, кластер ионов или вторичный структурный блок (SBU) металла в структуре MOF, который служит узлом, связывающим органические линкеры.

⁸ Линкер – органическая молекула (например, производное карбоновой кислоты или гетероциклическое соединение), которая соединяет коннекторы в структуре MOF.

3) Цеолиты (неорганические микропористые материалы): имеют малый и жестко фиксированный размер пор, что сильно ограничивает спектр загружаемых молекул и скорость их высвобождения.

В отличие от них, MOFs сочетают высочайшую емкость по загрузке (до 1.4 г лекарства на 1 г каркаса, как в случае ибупрофена в MIL-101⁹), строго контролируруемую кристаллическую структуру для предсказуемого высвобождения, а также возможность придания им таких критически важных для медицины свойств, как биосовместимость¹⁰, биоразлагаемость¹¹ и низкая токсичность. Таким образом, MOFs — это не просто пористые материалы, а программируемые молекулярные конструкции, чья архитектура и химия подчинены конкретным практическим целям. [15]

1.5. Биомедицинское применение MOFs: доставка лекарств и терапевтические функции.

Биомедицинское применение металлоорганических каркасов развивается по нескольким ключевым направлениям: адресная доставка лекарств¹², диагностика и создание биосенсоров. Высокая пористость позволяет использовать MOFs в качестве наноконтейнеров для веществ различного размера – от малых молекул (ибупрофен, прокаинамид) до крупных (витамин B12, белки, ферменты). [14]

Контролируемое высвобождение¹³ «груза» обеспечивается за счёт чувствительности каркаса к внешним или внутренним триггерам¹⁴: изменению pH, ионной силы, наличию специфических молекул (например, глюкозы), температуре, свету или магнитному полю. Ярким примером является система ZIF-8¹⁵, загруженная инсулином и ферментом глюкозооксидазой¹⁶, которая высвобождает инсулин в ответ на повышение

⁹ MIL-101 (Matériaux de l'Institut Lavoisier-101) – конкретный тип MOF на основе ионов хрома (III) и терефталат-ионов. Известен исключительно высокой пористостью и устойчивостью, используется для адсорбции газов и доставки лекарств.

¹⁰ Биосовместимость – способность материала выполнять свою функцию, не вызывая нежелательных местных или системных реакций в организме.

¹¹ Биоразлагаемость – Способность материала расщепляться в биологической среде (под действием ферментов, воды, клеточного метаболизма) на нетоксичные продукты, которые могут быть выведены из организма.

¹² Адресная доставка лекарств – стратегия доставки лекарственного средства непосредственно к целевым клеткам или тканям, минимизирующая воздействие на здоровые части организма.

¹³ Контролируемое высвобождение – управляемый процесс высвобождения активного вещества (например, лекарства) из носителя с заданной скоростью и/или в ответ на специфический стимул.

¹⁴ Триггер высвобождения – Внешний или внутренний фактор (изменение pH, температуры, ионной силы, наличие специфической молекулы, свет, магнитное поле), который вызывает высвобождение активного вещества из носителя, например, из MOF.

¹⁵ ZIF-8 (Zeolitic Imidazolate Framework-8) – конкретный и широко изученный тип металлоорганического каркаса на основе ионов цинка и имидазолат-линкеров. Известен своей химической стабильностью и pH-чувствительностью, что применяется для адресной доставки лекарств (например, инсулина).

¹⁶ Глутаматсинтететаза – фермент, катализирующий связывание токсичного аммиака с глутаминовой кислотой с образованием нетоксичного глутамина. Упомянут в контексте механизма действия MOF-705, содержащего L-аспарагиновую кислоту, которая стимулирует этот фермент

уровня глюкозы. Кроме того, некоторые MOFs сами могут выполнять терапевтическую функцию. [1]

Так, каркасы на основе биосовместимых компонентов, например bioMOF-1¹⁷ (на ионах цинка) или MOF-705 (на ионах натрия и L-аспарагиновой кислоте), при распаде в организме высвобождают активные лекарственные вещества или незаменимые аминокислоты, оказывая лечебное действие. Таким образом, MOFs представляют собой чрезвычайно гибкую и перспективную платформу для создания высокоэффективных и умных терапевтических систем. [5]

¹⁷ BioMOFs – Подкласс металлоорганических каркасов, специально сконструированный из биосовместимых и/или биологически активных компонентов (ионов металлов и органических линкеров) для применения в медицине и биологии.

Глава 2

2.1. Определение качеств модели MOFs.

Перед началом работы над моделью MOFs необходимо было определить какими качествами должен обладать конструктор, чтобы, в первую очередь, он был удобен потребителям; то есть обучающимся и преподавателям. Чтобы это проанализировать наиболее качественно, кроме выдвинутых предположений, был проведён опрос (Приложение 1.) среди двух групп: школьники старших классов и ученики классов с углублённым изучением химии или просто ей интересующиеся.

Обучающимся старших классов было предоставлено в анкетировании шесть вопросов, которые были ориентированы на анализ частоты использования различных моделей в обучении, их эффективность, по мнению обучающихся, а также заинтересованность в теме металлорганических каркасов. Анкетирование прошло 52 человека: 29 обучающихся, интересующихся химией и 23 не связанных с ней старшеклассника. По результатам заметно, что 78,8% опрошенных встречаются с моделями чего-либо при обучении, и 61,3% из них они помогают в понимании материала. Далеко не все обучающиеся просвещены в области металлорганических каркасов, но 67,3% опрошенных отметили свой интерес к теме и только 7,7% указали на обратное. Так же самым популярным ответом на вопрос о том, что могло бы помочь обучающимся понять тему, стал вариант "учебные материалы, написанные понятным языком" и не единожды в шестом вопросе опрошиваемые, писали о то, что к конструктору MOFs нужны будут инструкция и учебное пособие.

Также не мало важными были результаты интервью (Приложение 2-3), взятые у двух квалифицированных специалистов в области химии: у Баскаковой Светланы Анатольевны — педагога дополнительного образования фонда «Золотое сечение» и у Головачева Ивана Борисовича — кандидата химических наук и менеджера проектов по внедрению «Контур.Толк».

Светлана Анатольевна отметила, что MOFs актуальны в наши дни и это подтверждает нобелевская премия 2025 года, и важно рассказывать о достижениях современной науки обучающимся. Иван Борисович же указал на то, что металлоорганические каркасы — это тема весьма обширна, поэтому нужно будет правильно выбрать вектор её изучения. Кроме того, и Светлана Анатольевна, и Иван Борисович рассказывали, что в их опыте преподавания слишком часто встречается проблема с визуализацией чего-либо у обучающихся во время образовательного процесса, и часто это проблема как раз решается моделями: сборными или виртуальными.

Анализируя собранные данные, было сделано несколько выводов по поводу того в какую сторону стоит направлять проект, а также важные замечания по поводу самого конструктора:

1. Конструктор должен иметь возможность многократной сборки;
2. Важную роль имеет разделение конструктора на составляющие строения металлорганических каркасов;
3. С помощью конструктора должна быть возможность собрать несколько простых MOFs;

4. Конструктор должен быть похож визуально на настоящие металлоорганические каркасы для наградного прослеживания их свойств;
5. Необходимо визуально разделять разные элементы конструктора цветом;
6. К самому конструктору должна прилагаться инструкция по сборке.

2.2. Разбор строения для определения составляющих конструктора.

На основе разбора строения металлоорганических каркасов из теоретической части, можно понять, что сами MOFs — это достаточно громоздкие структуры, в сравнении с простыми органическими соединениями, для которых обычно создаются различные конструкторы для сбора моделей. Чтобы определиться с составляющими конструктора было проанализированы плюсы и минусы нескольких возможных вариантов разделения конструктора на части (Приложение 5.).

Исходя из собственных наблюдений и выводов, самым выгодным вариантом для разделить конструктора будет разделение его на линкеры, радикалы и координационные фигуры, так как это упростит сборку, позволит показать, как работают свойства MOFs и потребует не большое количество материала для создания.

2.3. 3D моделирование конструктора.

После анализа всех необходимых данных, началась работа над 3D моделям сборных деталей молекулярного конструктора в таких программах как: Blender и T-Flex CAD 17.

Процесс был разделён на несколько этапов:

1. Создание чертежа;
2. Перенос его в 3D программу;
3. Создание необходимого объёма для детали.

В процессе все промежуточные этапы фиксировались по средствам фото (Приложение 6.1.) или видео.

При моделировании необходимо было учитывать погрешность при 3D печати и возможности самого принтера, для воссоздания сферических фигур; поэтому в последних версиях модели были разделены на несколько частей и увеличены в размерах, по сравнению с первыми версиями (Приложение 6.2.)

2.4. 3D печать.

Первая попытка печати линкеров и координационных фигур стала пробной и помогла выяснить несколько важных особенностей процесса:

1. Принтер испытывает сложности печати сферических объектов в выбранной размерности, так как печатает слоями;

2. Погрешность в размерах весьма большая, поэтому стоит увеличить модели минимум в 1,5 раз;

3. Для качественной печати нужна большая площадь соприкосновения с плоскостью печати.

После отслеживания особенностей печати модели были пересмотрены: линкеры были разделены на две части, у координационных фигур были сглажены углы, а также все было увеличено в 1,5 раз.

Вторая попытка печати исправила все главные ошибки первой и стала финальной, перед первой версией конструктора. (Приложение 6.3. - 6.4.)

2.5. Разработка пособия по использованию конструктора.

По результатам анкетирования было выяснено, что для конструктора будет необходима инструкция для конструктора. Для того, чтобы она была удобна в использовании, она должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Объяснять этапы сборки конструктора;
2. Иметь список деталей и их размерность;
3. Правила безопасного использования.

Создание пособия прошло в два этапа: набросок и финальный вариант. Процесс работы проходил в программе для дизайна Figma.

2.6. Создание канала в социальной сети «ВКонтакте».

Для более подробного информирования про данный проект нужно было найти платформу, на которой будет удобно выставлять материалы по созданию и разработке конструктора и будет иметь перспективу о возможности выставлять дополнительные просветительские материалы на тему металлоорганических каркасов.

Подобной платформой стала социальная сеть «ВКонтакте», который имеет возможность создания публичных «каналов»; поэтому был создан канал «MOFs | проект», в котором будут выставляться все накопившейся материалы по проекту и просто информация про металлоорганические каркасы. (Приложение 6.5.)

Заключение

По окончанию проекта был создан конструктор металлоорганических каркасов, пособие к нему, а также сообщество в социальной сети «ВКонтакте». Этот проект дал возможность погрузиться в тему MOFs и открыл перспективу, чтобы рассказать об новом и столь важном отделении химии; пуск и открытие само по себе было сделано ещё в конце XX века, но его значимость проявилась не столь давно.

В процессе эмпирической части, судя по ответам обучающихся и преподавателей, можно сделать вывод, что наглядный макет, а, в данном случае, конструктор, помогает в понимании темы любой сложности. Пуск и на основе этих данных гипотеза является доказуемой, но есть несколько нюансов: это то, каким именно должен быть этот конструктор. Недостаточно просто его присутствия, он должен иметь некоторые качества: наглядность, простота, визуальная привлекательность, разборность и другое, что уже было описано во второй главе. Учитывая вышеперечисленное, можно сказать, что гипотеза была доказана.

Возникло и несколько проблем в проекте уже в процессе; прежде всего нужно было научиться правильно работать с форматами файлов для 3D принтера, после чего скорректировать погрешности в печати, некоторые из которых стали совершенно не очевидными, кроме того необходимо было сделать выбрать такую информацию, чтобы рассказать о свойствах металлоорганических каркасов и объяснить их, но не углубляться в их суть.

Проект изначально был нацелен на создание конструктора для информирования о теме металлоорганических каркасов, а также привлечения внимания к ней; поэтому были рассмотрены только самые важные аспекты в формировании отделения металлоорганики и самих каркасов.

Безусловно проект будет продолжаться и, в перспективе, появится больше различных моделей MOFs, что должно заинтересовать будущих химиков.

Список используемых источников

1. Ефимова, А. А., Сыбачин, А. В. Стимул-чувствительные системы для доставки лекарств на основе бислойных липидных везикул: новые тенденции [Текст] / А. А. Ефимова, А. В. Сыбачин // Коллоидный журнал. — 2023. — Т. 85, № 5. — С. 566-582.
2. Зайцева, Е. А. Разработка К.В.Циглером и Дж.Наттой катализаторов для синтеза полимеров [Текст] / Е. А. Зайцева // Химия. — 2003. — № 16.
3. Исаева, В. И., Кустов, Л. М. Металлоорганические каркасы - новые материалы для хранения водорода [Текст] / Москва: Рос. хим. ж., 2006 — 72 с.
4. Курамшин, А. И., Колпакова, Е. В. Теоретические основы химии металлоорганических соединений переходных металлов и применение комплексов переходных металлов в катализе [Текст] / г. Казань, ул. Профессора Нужина, 1/37: Издательство Казанского университета, 2016 — 135 с.
5. Immunoadjuvant-functionalized metal-organic frameworks: synthesis and applications in tumor immune modulation [Текст] / {surnames_reversed} // Chemical Communications. — 2024. — № 10.
6. Бездонная сумка Гермионы. За что дали Нобелевку по химии в 2025 году / [Электронный ресурс] // газета.ру : [сайт]. — URL: <https://www.gazeta.ru/science/2025/10/08/21826298.shtml> (Дата обращения: 20.09.2025)
7. История, полная дыр. За что вручили Нобелевскую премию по химии в 2025 году / [Электронный ресурс] // N+1 : [сайт]. — URL: <https://nplus1.ru/material/2025/10/15/metal-organic-frameworks> (Дата обращения: 17.09.2025)
8. Каде де Гассикур, Луи Клод / [Электронный ресурс] // NobelPrize.org : [сайт]. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Каде_де_Гассикур,_Луи_Клод (Дата обращения: 20.09.2025)
9. Металлоорганические каркасы / [Электронный ресурс] // chemical42 : [сайт]. — URL: <https://chemical42.ru/tutorials/kompleksnye-soedineniya/metalloorganicheskie-karkasy/> (Дата обращения: 2.10.2025)
10. Металлоорганические соединения / [Электронный ресурс] // Рувики : [сайт]. — URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Металлоорганические_соединения (Дата обращения: 20.09.2025)
11. Миллиардные индустрии зависят от того, чего нет: фраза, которую нельзя было пропустить / [Электронный ресурс] // Хабр : [сайт]. — URL: <https://habr.com/ru/articles/968122/> (Дата обращения: 24.09.2025)
12. Омар М. Яги / [Электронный ресурс] // Википедия : [сайт]. — URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.b9bad136-6977a19e-174334df-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Omar_M._Yaghi (Дата обращения: 21.09.2025)
13. Элементоорганическая химия / [Электронный ресурс] // картаслов.ру : [сайт]. — URL: <https://kartaslov.ru/карта-знаний/Элементоорганическая+химия> (Дата обращения: 20.09.2025)
14. Biomedically-relevant metal organic framework-hydrogel composites / [Электронный ресурс] // The Royal Society of Chemistry: [сайт]. — URL:

- <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/bm/d2bm01906j> (Дата обращения: 27.09.2025)
15. Chitosan modified metal–organic frameworks as a promising carrier for oral drug delivery / [Электронный ресурс] // The Royal Society of Chemistry : [сайт]. — URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.e7f21b42-6977a4d4-6fd39f11-74722d776562/https/pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ra/d0ra08459j (Дата обращения: 7.10.2025)
16. New synthetic routes towards MOF production at scale / [Электронный ресурс] // The Royal Society of Chemistry : [сайт]. — URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.96ee49c0-6977a397-5585d19c-74722d776562/https/pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2017/cs/c7cs00109f (Дата обращения: 20.09.2025)
17. Nobel Prize in Chemistry 2025 / [Электронный ресурс] // NobelPrize.org: [сайт]. — URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2025/summary/> (Дата обращения: 7.10.2025)

Приложения

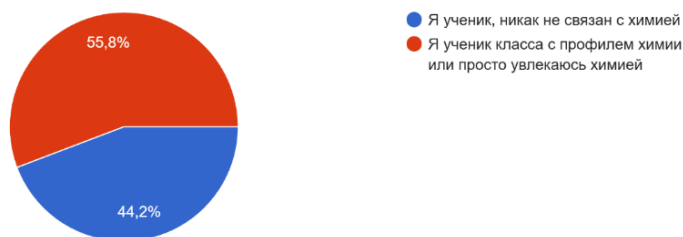
Приложение 1.

Результаты онлайн опроса обучающихся старших классов.

Анкетирование прошло 52 обучающихся; среди которых были обучающиеся 10-11 классов МАОУ СОШ 15 города Серова, участники проекта по профориентации для школьников старших классов «Унилаб» по направлению «химия».

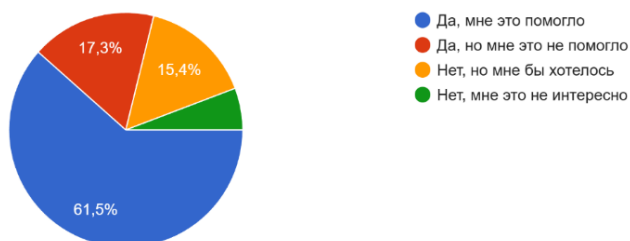
Вопрос 1.

Кем вы являетесь?
52 ответа



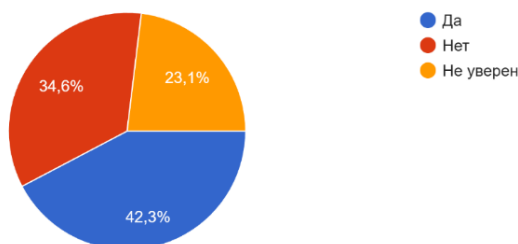
Вопрос 2.

На уроках вы когда нибудь занимались с моделями по химии, физике или любому другому предмету? Помогло ли вам это? (Например: конс... физике, модели фигур в стереометрии и др.)
52 ответа



Вопрос 3.

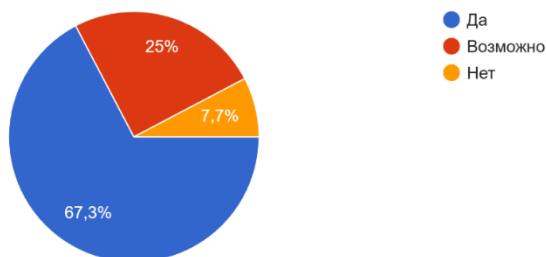
Вы когда нибудь слышали о металлоорганических каркасах?
52 ответа



Вопрос 4.

Вам кажется эта тема интересной?

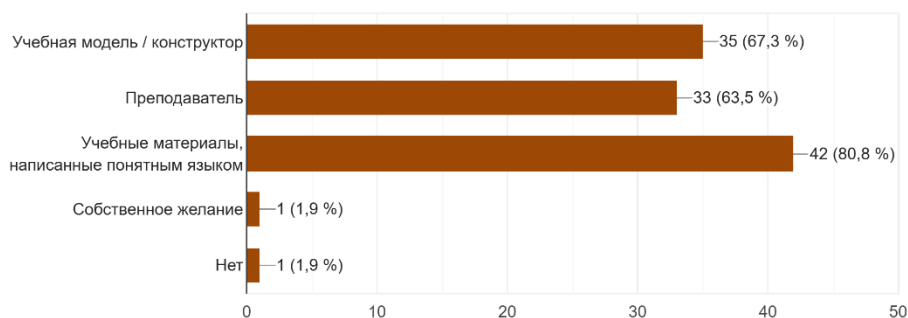
52 ответа



Вопрос 5.

Как вы думаете, чтобы вам могло помочь в изучении этой темы?

52 ответа



Вопрос 6.

Как вам кажется, каким должен быть конструктор MOFs, чтобы он был вам понятен или заинтересовал вас в теме?

Выборка интересных и информативных ответов:

- «1. Каждая деталь должна иметь свой цвет (для отличия элементов конструкции).
2. Детали должны быть легкозакрепляемыми, что бы ученики всех возрастов могли взаимодействовать с моделью.
3. Конструктор должен иметь средний размер, что бы дети не маялись с маленькими деталями, но и что бы в кабинет входил.», «Он должен, по возможности, сохранять пропорции и отвечать формам настоящей молекулы. Модель должна иметь возможность разборки, чтобы структурно демонстрировать продукты хотя бы некоторых хим превращений с MOF. Должна, по возможности, содержать все основные особенности структурного строения всех соединений этого «класса».», «3D, достаточно ярким, простым в использовании и запоминающимся (можно какой-нибудь необычной формы, лучше запомнится)».

Интервью с Баскаковой Светланой Анатольевной.

Баскакова Светлана Анатольевна — педагог химии дополнительного образования фонда «Золотое сечение».

1) Как вам кажется, актуальна ли сейчас тема металлоорганических каркасов? Подходит ли она для внеурочного обучения школьникам?

— Тема металлоорганических органических каркасов актуальна в наши дни, что подтверждает нобелевская премия по химии 2025-го года. А современное научное развитие важно показывать в школах.

2) Часто ли в вашей работе возникает проблема с тем, что обучающийся не может визуализировать какую-либо составляющую темы/задачи по химии?

— Да, часто. Даже просто задачи на растворы бывает сложно решить, а структуры особенно важно представлять в органической химии, что становится проблемой.

3) Используете ли вы в своей работе какие-нибудь сборные модели или 3D фигуры?

— Я использую сборные модели, когда речь заходит о кристаллической решётке или органики, но может так же использоваться в биохимии.

4) Как вам кажется, мог ли пригодиться конструктор моделей металлоорганических соединений, например, при объяснении тем для школьников?

— Он бы мог помочь с развитием пространственного мышления, а также возможность из элементов каркаса собирать разные структуры.

5) Какими свойствами должен обладать на ваш взгляд подобный конструктор, чтобы он был удобен в использовании? Мог бы он пригодиться и для изучения других тем в химии/физике?

— Он может быть нужен для кристаллические структур и координационных соединений.

Интервью с Головачевым Иваном Борисовичем.

Головачев Иван Борисович — кандидат химических наук и менеджер проектов по внедрению «Контур.Толк».

1) Как вам кажется, актуальна ли сейчас тема металлоорганических каркасов? Подходит ли она для внеурочного обучения школьников?

— Смотря, что имеется в виду под «металлоорганическими каркасами». Если брать в разрезе конкретно каркасов для биохимии, когда металлоорганическое соединение представляет собой матрицу для построения тканей, например, то я бы сказал это очень узкое применение. И подходит скорее для написания реферата. Если рассматривать металлоорганические соединения в принципе для изучения их свойств, тогда скорее подходит для внеурочного обучения.

2) Часто ли в вашей работе возникает проблема с тем, что обучающийся не может визуализировать какую-либо составляющую темы/задачи по химии?

— Слишком часто, к сожалению.

3) Используете ли вы в своей работе какие-нибудь сборные модели или 3D фигуры?

— Использую периодически, для наглядной демонстрации формы молекул.

4) Как вам кажется, мог ли пригодиться конструктор моделей металлоорганических соединений, например, при объяснении тем для школьников?

— Тут я бы спросил в ответ, а в чем отличие конструктора именно металлических соединений от конструктора органических соединений? И, исходя уже из ответа на этот вопрос стоит размышлять о применении.

5) Какими свойствами должен обладать на ваш взгляд подобный конструктор, чтобы он был удобен в использовании? Мог бы он пригодиться и для изучения других тем в химии/физике?

— Тут опять же вопрос в отличиях от уже существующих. Какие свойства, принципиально отличающиеся от простых органических соединений, будет показывать этот конструктор? К сожалению, компетенции в области металлоорганики у меня мало, поэтому сказать, какими свойствами данный конструктор должен обладать, я не могу.

Дополнительные комментарии от специалистов в области химии.

Ответы на вопрос: «С чего, как вам кажется, стоит начать изучение металлоорганических каркасов?»

Комментарий 1.

«Начать стоит с органики; понятия комплексов и комплексных соединений – как и почему происходит самосборка молекул.»

Комментарий 2.

«С применения МОФов, а далее рассмотреть механизм самосборки органических веществ»

Комментарий 3.

«С рассмотрения возможных типов межмолекулярного взаимодействия и принципов образования комплексов.»

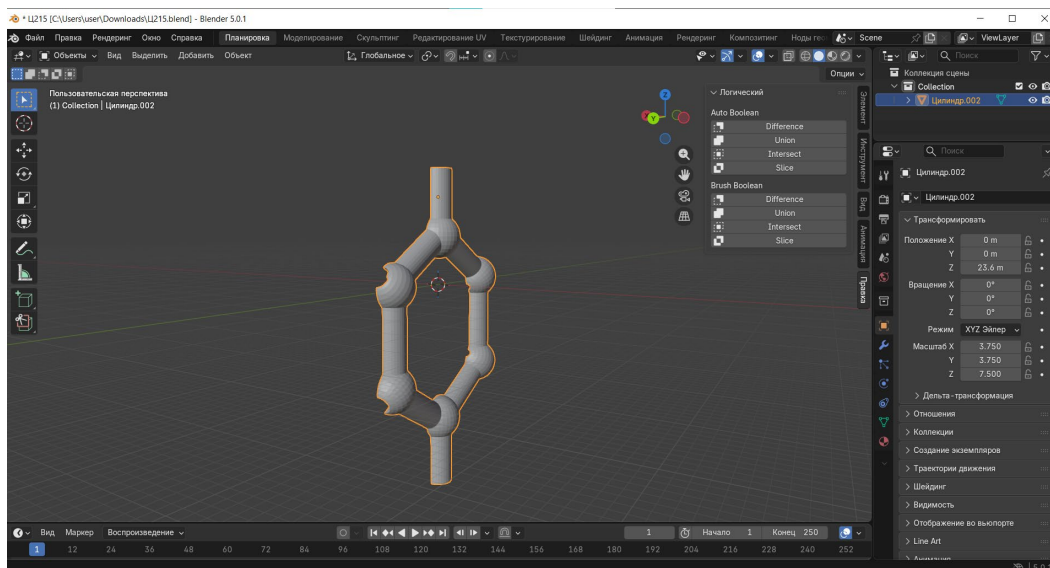
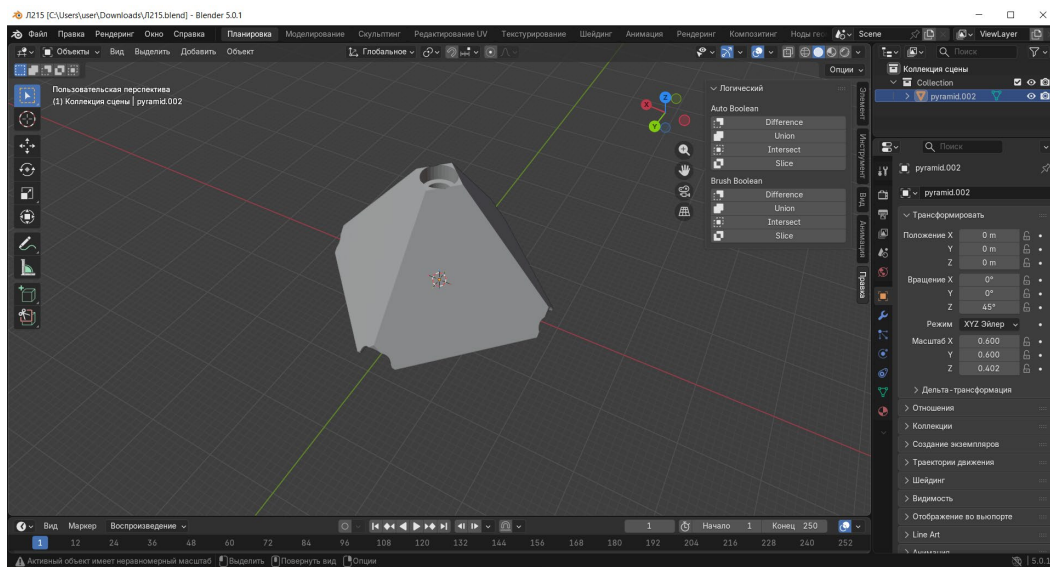
Комментарий 4.

«Со строения органических веществ и физических параметров MOFs»

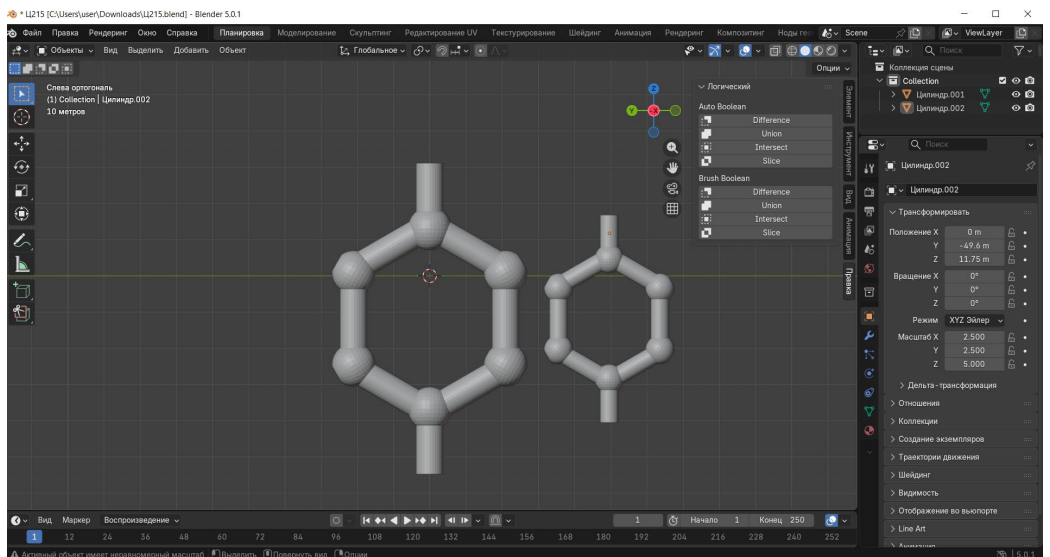
Вариации разделения конструктора на составляющие.

| Вариант | Плюсы | Минусы |
|--|---|---|
| Атомы и связи между ними | <ol style="list-style-type: none"> 1. Большая детализация; 2. Вариативность сборки; | <ol style="list-style-type: none"> 1. Долгая сборка; 2. Сложность выбора материала для возможности сборки деталей; 3. Много вариаций одного и того же элемента для воссоздания сложных линкеров и координационных фигур. |
| Линкеры, радикалы и координационные фигуры | <ol style="list-style-type: none"> 1. Простота сборки; 2. Возможность показать самые важные свойства MOF; 3. Хорошее визуальное разделение на функциональные группы; 4. Большой выбор материала для создания. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Для различных видов MOFs понадобятся новые детали; |
| Вторичные строительные единицы | <ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность сборки больших структур. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Минимальна детализация; 2. Громоздкость модели; 3. Хрупкость конструкции; 4. Длительный срок создания; 5. Плохая визуализация свойств MOF. |

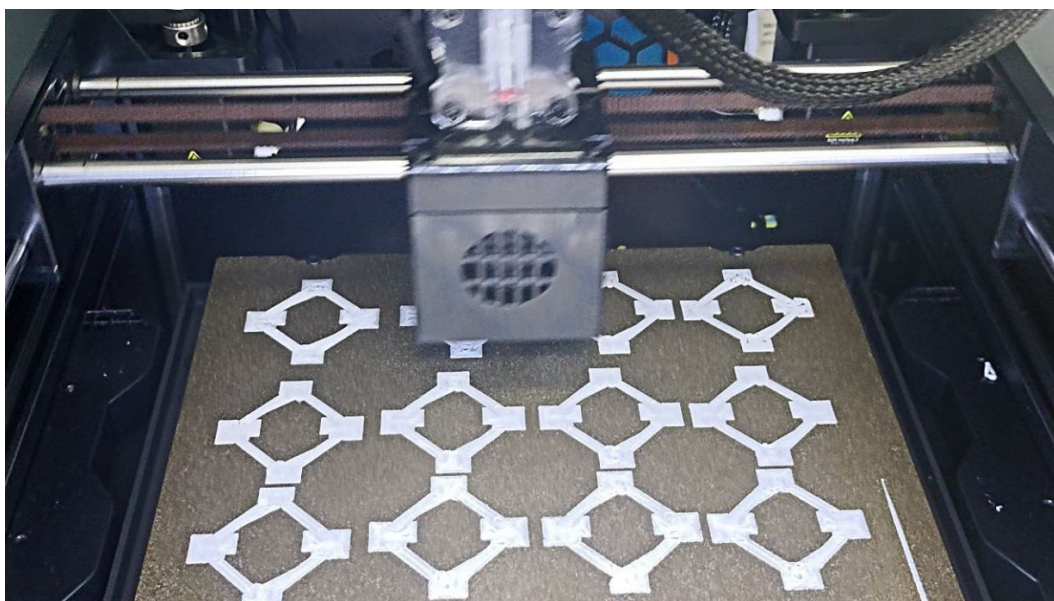
6.1. Процесс 3D моделирования



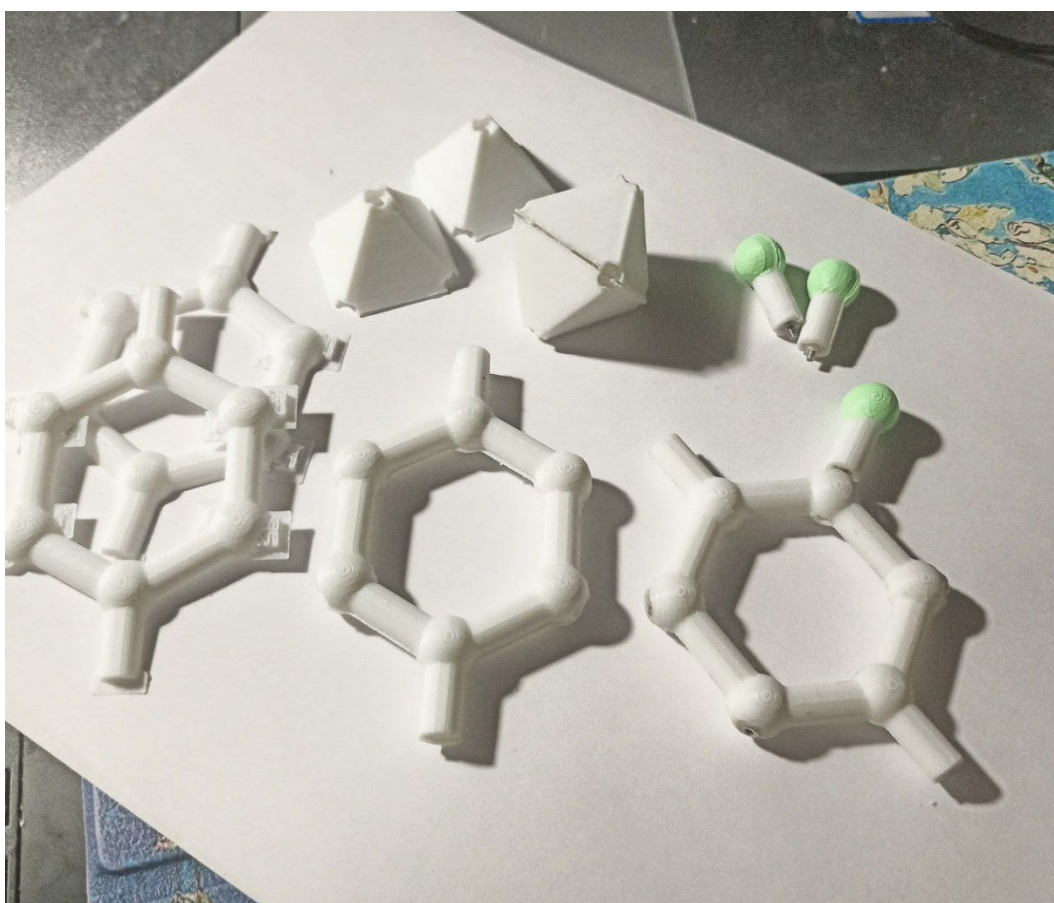
6.2. Сравнение старого и нового размера линкера в Blender.



6.3. 3D печать



6.4. Процесс сборки и покраски модели.



6.5. ВК сообщество

