

ХИМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ ГЛЮКОЗЫ КИСЛОРОДОМ ВОЗДУХА ПРИ ОБУЧЕНИИ ХИМИИ

А. А. Сутягин, В. В. Меньшиков

Исследование выполнено при финансовой поддержке Шадринского государственного педагогического университета, тема научно-исследовательской работы «Методическое сопровождение и оценка профессиональных компетенций будущего учителя химии в современных условиях».

Аннотация

Введение. Рассмотрены возможности использования реакции с участием глюкозы для демонстрации роли кислорода как основного компонента окислительно-восстановительной реакции, а также для визуализации окислительно-восстановительных реакций с участием органических соединений при изучении механизма их протекания.

Материалы и методы. Использование методов демонстрационного химического эксперимента позволяет обеспечить визуализацию сложных многостадийных процессов, протекающих при окислении глюкозы кислородом воздуха. Отдельные элементы статьи посвящены использованию методов химического эксперимента при организации исследовательской деятельности.

Результаты исследования. Показано, что для визуализации процесса окисления глюкозы кислородом воздуха могут быть использованы различные индикаторы, изменяющие окраску среды в зависимости от окислительно-восстановительных условий: метиленовый синий, индигокармин, резазурин, тионин, феносафранин. Реакцию необходимо проводить в щелочной среде, при этом для обеспечения безопасности эксперимента возможна замена твердой щелочи на карбонат или гидрокарбонат натрия, но замена приведет к существенному снижению скорости процесса и к увеличению интервалов переходов. Использование высоких концентраций красителя также приводит к резкому замедлению процесса, что может быть связано с супрамолекулярной самоорганизацией с образованием крупных молекулярных агрегатов молекул красителя и растворителя, менее активных при генерации синглетного кислорода. Данная агрегация обусловлена межмолекулярными электростатическими взаимодействиями. Показано, что индикатор выполняет роль переносчика синглетного кислорода из атмосферного воздуха к молекуле глюкозы, а окисление глюкозы протекает через образование ацилоина с последующим внутримолекулярным окислением — восстановлением.

Заключение. Описанные авторами демонстрационные и исследовательские химические эксперименты могут быть использованы на уроке химии в средней школе как методический прием, направленный на развитие творческого мышления обучающихся, расширение представлений о химических свойствах углеводов и участие веществ-индикаторов в протекании химической реакции. Представленные эксперименты могут быть использованы для организации исследовательской деятельности обучающихся, например при изучении вопросов химической кинетики.

Ключевые слова: демонстрационный химический эксперимент, окислительно-восстановительные реакции, механизм реакций, кинетика реакций, окислительно-восстановительные индикаторы, перенос кислорода

CHEMICAL EXPERIMENT FOR VISUALIZING THE PROCESS OF GLUCOSE OXIDATION BY ATMOSPHERIC OXYGEN IN CHEMISTRY TEACHING

A. A. Sutyagin, V. V. Menshikov

The study was supported by a grant from Shadrinsk State Pedagogical University, research topic “Methodological Support and Assessment of Professional Competencies of the Future Chemistry Teacher in Modern Conditions”.

Abstract

Introduction. This article discusses the potential of using a reaction involving glucose to demonstrate the role of oxygen as the main component in a redox reaction and to visualize redox reactions involving organic compounds when studying their mechanisms.

Materials and Methods. Demonstration-type chemical experiments allow visualization of complex multi-stage processes occurring during glucose oxidation by atmospheric oxygen. Separate sections of the article are devoted to the use of chemical experimental methods in organizing research activities.

Results. It has been demonstrated that various indicators that change the color of the medium depending on redox conditions — methylene blue, indigo carmine, resazurin, thionine, and phenosafranin — can be used to visualize glucose oxidation by atmospheric oxygen. The reaction must be carried out in an alkaline medium. To ensure experimental safety, solid alkali can be replaced with sodium carbonate or sodium bicarbonate; however, this significantly reduces the reaction rate and increases transition intervals. High dye concentrations also markedly slow down the process, possibly due to supramolecular self-organization, leading to the formation of large molecular aggregates of dye and solvent molecules that are less active in generating singlet oxygen. This aggregation results from intermolecular electrostatic interactions. It has been shown that the indicator acts as a carrier of singlet oxygen from atmospheric air to the glucose molecule, and glucose oxidation occurs through the formation of acyloin followed by intramolecular redox reactions.

Conclusions. The demonstration-type and exploratory chemical experiments described can be used in secondary school chemistry lessons to develop students' creative thinking, enhance their understanding of carbohydrate chemical properties, and illustrate the role of indicator substances in chemical reactions. These experiments can also serve as a framework for organizing student research activities, for example, in the study of chemical kinetics.

Keywords: demonstration-type chemical experiment, redox reactions, reaction mechanism, reaction kinetics, redox indicators, oxygen transfer

Введение

Одним из ключевых базовых понятий при изучении химии выступает окислительно-восстановительная реакция. Характеризуясь как сквозное, представление об окислительно-восстановительных процессах пронизывает весь школьный курс химии (Шалашова 1998, 8). В то же время в 10-м классе при изучении органической химии этот термин исследуется недостаточно полно и подробно, несмотря на важную роль окислительно-восстановительных реакций с участием органических соединений в практической

деятельности человека. Так, при изучении химических реакций, характерных для отдельных классов органических соединений, не затрагивается понятие «степень окисления атома элемента» (Раткевич и др. 2012), а в ряде случаев описание окислительно-восстановительного взаимодействия проводится не в виде уравнений химических реакций, а на уровне схематичных описаний превращения исходных веществ в продукты (Башмаков 2017; Волкова 2017).

Даже на профильном уровне изучения практически не уделяется внимания механизмам окислительно-восстановительных

реакций, а также отличиям в подходах к окислительно-восстановительным реакциям, связанных с этими механизмами. Так, в основе представлений об окислительно-восстановительных реакциях в органической химии лежит кислородно-водородный баланс между исходными веществами и продуктами реакции: под процессом окисления рассматривается увеличение в органической молекуле числа атомов кислорода или снижение в ней числа атомов водорода. Под восстановлением, в противоположность этому, понимается снижение в органической молекуле числа атомов кислорода и увеличение числа атомов водорода. При таком подходе подчеркивается ведущая роль кислорода в процессе окисления (Новошинский, Новошинская 2024).

Изучение окислительно-восстановительных реакций с участием органических соединений относится к проблемным методическим вопросам, что связано со сложностью механизмов протекающих реакций, а также с зависимостью направления протекания процесса от выбора окислителя и условия проведения процесса. В результате, возникают затруднения при формировании у обучающихся единой картины окислительно-восстановительных процессов в органической химии, что значительно снижает их заинтересованность и мотивацию к изучению окислительно-восстановительных реакций и их важнейшей роли в практической деятельности человека и формировании глобальной природной системы (Кузнецова и др. 2012; Сабирова 2021).

Демонстрационные эксперименты, визуализирующие окисление углеводов

Одним из приемов, используемых для повышения заинтересованности обучающихся в изучении окислительно-восстановительных процессов, является демонстрация химических экспериментов на основе окислительно-восстановительных реакций, характеризующихся ярким визуальным эффектом. В качестве примера можно привести экс-

перименты, реализуемые при изучении химических свойств углеводов. Так, широкой популярностью пользуются лабораторные опыты по окислению глюкозы аммиачным комплексом гидроксида серебра (реакция серебряного зеркала) или гидроксидом меди (реактивом Фелинга).

В то же время возможно проведение лабораторных опытов, в которых в качестве окислителя глюкозы выступает кислород воздуха. Достижение интересных визуальных эффектов в данном случае возможно при использовании в эксперименте окислительно-восстановительных индикаторов, изменяющих свою окраску в зависимости от кислородных условий среды: метиленовый синий, индигокармин, резазурин, тионин и т. д. Приведем пример проведения эксперимента в присутствии метиленового синего (Иванова, Кононова 1969, 65; Dutton 1960).

В демонстрационную пробирку объемом 20 см³ налить 10 см³ дистиллированной воды и растворить в ней 0,18 г гидроксида натрия или калия. *Внимание! Гидроксиды щелочных металлов являются едкими веществами, которое при попадании на кожу или в глаза может вызвать сильные ожоги. Для предотвращения попадания в глаза и на кожу наденьте соответствующие защитные средства (очки, перчатки, халат).*

К полученному раствору прибавить 0,2 г глюкозы и 3–5 капель водного раствора метиленового синего с массовой долей красителя 0,25 %. Закрыть пробирку пробкой и выдерживать до тех пор, пока не произойдет полное обесцвечивание синего раствора. После этого встрихнуть пробирку несколько раз, в результате чего происходит восстановление синей окраски, которая вновь исчезает через некоторое время при отстаивании раствора. Опыт повторяется несколько раз с чередованием обесцвечивания и восстановления синей окраски. Интервал обесцвечивания составляет примерно 40 секунд. Через некоторое время пробирку можно открыть для пополнения системы кислородом воздуха и продолжить процесс. В результате

цикл изменения окраски может продолжаться в течение нескольких часов.

С целью обеспечения техники безопасности при работе с обучающимися возможна замена при проведении эксперимента твердой щелочи на карбонат или гидрокарбонат натрия. В то же время такая замена нежелательна, так как она приводит к существенному снижению скорости процесса и к увеличению интервалов переходов.

Объяснение визуальных эффектов в данном случае заключается в обратимых окислительно-восстановительных превращениях красителя метиленового синего и глюкозы, протекающих под действием кислорода воздуха. В реакции с этим окислителем происходит окисление молекул глюкозы (I) с образованием смеси глюконовой (II) и глюкуроно-

вой (III) кислот, а также δ -глюконолактона (IV) и других продуктов окисления (рис. 1).

Метиленовый синий представляет собой краситель гетероциклической природы, широко используемый как окислительно-восстановительный индикатор (Бишоп 1976, 94–96). В водном растворе краситель проявляет ярко-выраженную темно-синюю окраску окисленной формы катиона (VA, VB), переходя при восстановлении в бесцветную лейкоформу (VI) (рис. 2).

В присутствии кислорода лейкоформа вновь переходит в окрашенную форму катиона, при этом с ростом значений pH скорость процесса возрастает и процесс легко протекает в щелочной среде (Наянова и др. 2015). На основании этого, несмотря на то что роль метиленового синего в процессе

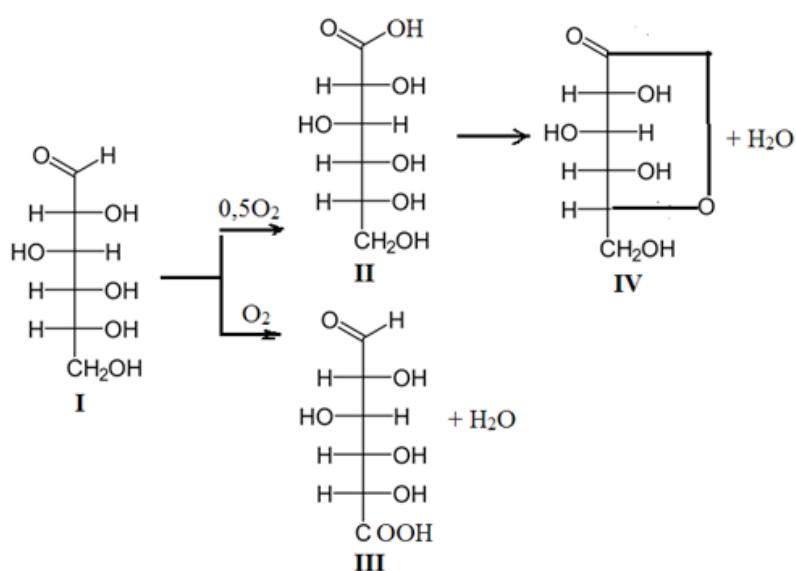


Рис. 1. Варианты окисления D-глюкозы кислородом воздуха

Fig. 1. Variants of D-glucose oxidation by atmospheric oxygen

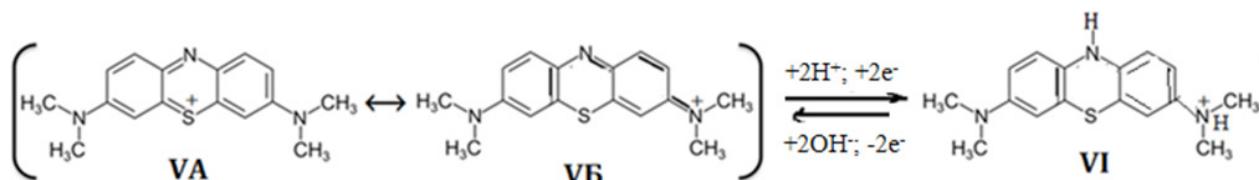


Рис. 2. Взаимопревращения структуры метиленового синего в различных условиях окислительно-восстановительной среды

Fig. 2. Interconversions of the structure of methylene blue under various redox conditions

окисления глюкозы не до конца изучена, можно предположить, что он является переносчиком синглетного кислорода из атмосферного воздуха к молекуле глюкозы, катализируя процесс окисления. Это подтверждается и тем фактом, что при высоких концентрациях красителя в растворе процесс окисления глюкозы протекает крайне медленно. Это может быть связано с тем, что при высоких концентрациях в растворе за счет межмолекулярных взаимодействий между молекулами красителя и растворителя происходит супрамолекулярная самоорганизация с образованием крупных молекулярных агрегатов, стабилизированных электростатическими взаимодействиями (Fernández-Pérez et al. 2020). Такие агрегаты менее активны при генерации синглетного кислорода, что замедляет процесс окисления глюкозы (Tardivo et al. 2005).

Ранее считалось, что окислению до карбоксильной группы в щелочных условиях подвергается альдегидная группа в молекуле глюкозы. В то же время при проведении серии экспериментов (Shakhshiri 1985, 232) показано, что аналогичные визуальные эффекты наблюдаются при использовании вместо глюкозы аскорбиновой кислоты (витамин С), молекулы которой не содержат в составе альдегидной группы. В связи с этим можно предположить, что окисление глюкозы протекает через образование 1,2-дикарбонильного соединения — ацилоина (VII) с последующим внутримолекуляр-

ным окислением — восстановлением (рис. 3).

Вместо метиленового синего для проведения опыта могут быть использованы и другие окислительно-восстановительные индикаторы. Например, при аналогичной последовательности проведения эксперимента, но прибавлении в систему нескольких капель водного раствора индигокармина (VIII) с массовой долей красителя 1 % наблюдается обратимое последовательное изменение окраски раствора от зеленого к желтому и красному цветам («химический светофор»), соответствующим восстановленным формам красителя (IX, X). Цикл изменения окрасок раствора составляет от 40 до 50 секунд.

При использовании в реакции 1%-го водного раствора резазурина (XI) наблюдаются переходы окрасок от сине-фиолетового к красному (восстановленная форма XII) и обратно с интервалами превращений в 1 минуту.

Эффекты, аналогичные эксперименту с метиленовым синим (обесцвечивание и восстановление синей окраски), но с меньшей скоростью наблюдаются при использовании 1%-го спиртового раствора тионина (фиалка Лаута) (синяя окисленная форма XIII α , XIII β и бесцветная форма XIV).

Использование в качестве красителя 0,5%-го водного раствора феносафранина (ХВА, ХВБ) приводит к обратимому обесцвечиванию красного раствора при переходе

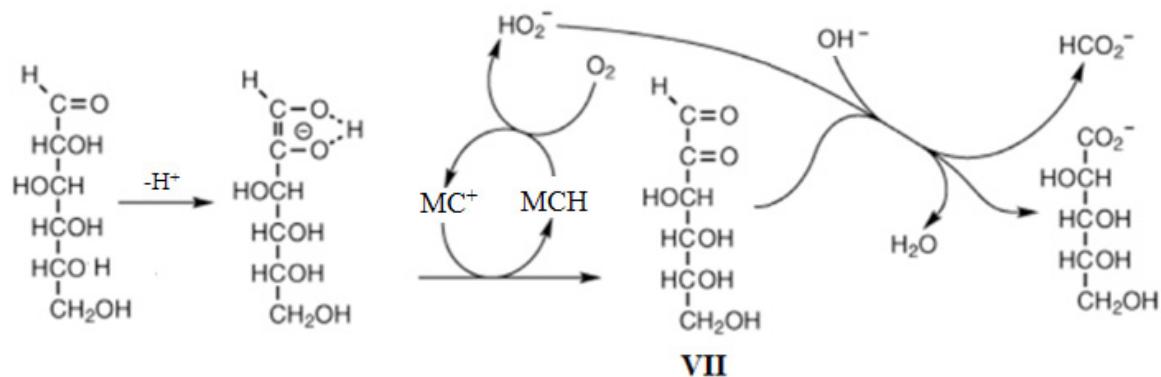


Рис. 3. Схема окисления глюкозы при участии метиленового синего

Fig. 3. Scheme of glucose oxidation in the presence of methylene blue

в восстановленную форму (XVI), при этом скорость обратимых переходов, как и в случае использования тионина, меньше, чем при использовании метиленового синего.

Структурные взаимопревращения в молекулах используемых кислотно-основных индикаторов (Бишоп 1976) представлены на рисунке 4.

Расширение методических возможностей использования демонстрационного эксперимента окисления глюкозы

Выполнение предложенных экспериментов с участием глюкозы позволяет конкретизировать представление о процессе окисления органических соединений, демонстрируя ведущую роль в нем кислорода. Так, при сравнении структурной формулы глюкозы

с формулами ее окисленных форм ученики должны отметить, что во всех окисленных формах число атомов кислорода в молекуле больше, чем в молекуле исходной глюкозы. Исходя из этого можно сделать вывод, что процесс окисления органического соединения — это повышение в его молекуле числа атомов кислорода.

Также в ходе обсуждения эксперимента ученикам предоставляется дополнительная информация о том, что растворы глюкозы являются достаточно устойчивыми и в обычных условиях глюкоза в них не окисляется кислородом воздуха, или кислородом, растворенным в воде. Но при введении в раствор соответствующих красителей протекает процесс окисления. На основании этого факта и на основе демонстрируемых формул окисленных и восстановленных форм кра-

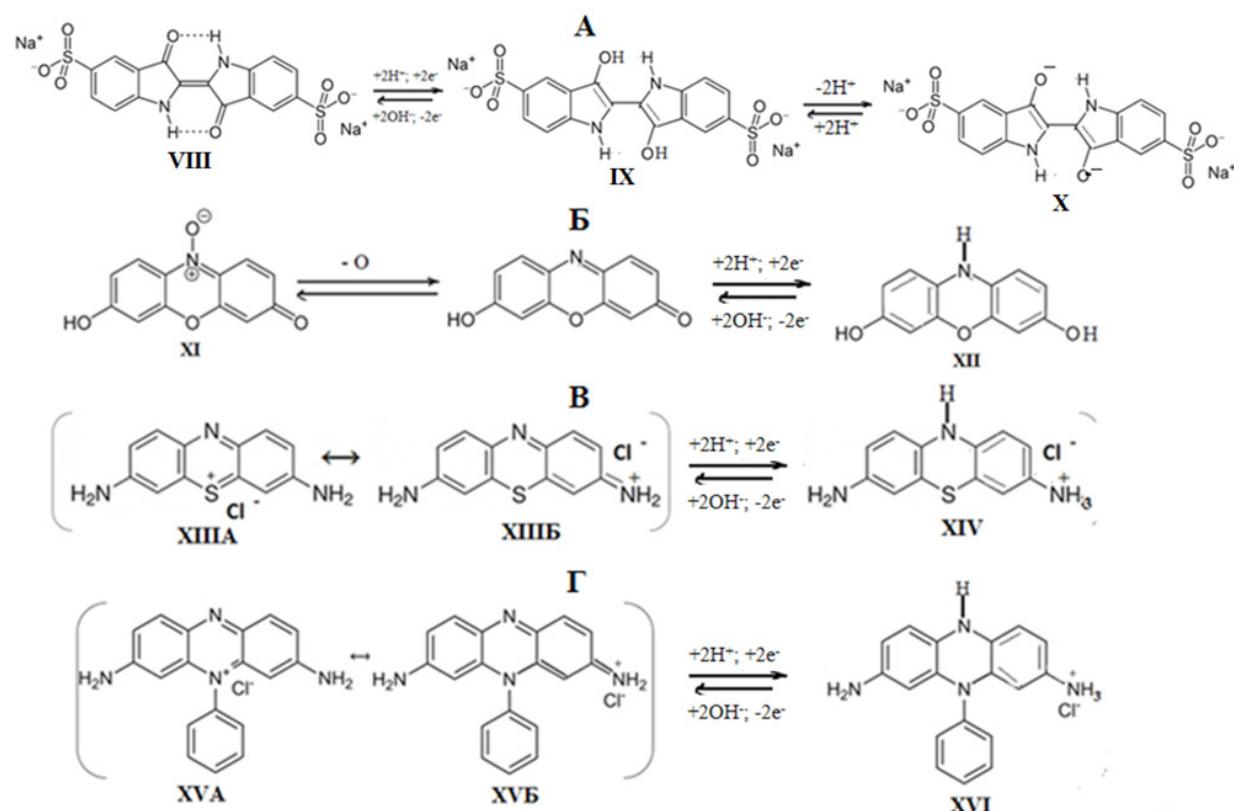


Рис. 4. Взаимопревращения структур кислотно-основных индикаторов:
А — индигокармин, Б — резазурин, В — тионин, Г — феносафранин

Fig. 4. Interconversions of acid-base indicator structures:
A — indigo carmine, Б — resazurin, В — thionine, Г — phenosafranin

сителей ученикам предлагается сделать вывод об их роли в данном процессе. На основе сравнения структур красителей ученики могут сделать вывод о том, что сами эти соединения не могут выступать в качестве окислителей глюкозы, так как не могут предоставить свободные атомы кислорода. В то же время они могут выступать в качестве переносчика атома кислорода, резко ускоряя процесс окисления. Одновременно с этим конкретизируется представление о химических индикаторах как веществах, позволяющих фиксировать протекание химической реакции за счет появления аналитического сигнала, обусловленного изменением структуры молекулы индикатора.

В ходе выполнения эксперимента может быть реализован межпредметный подход. Так, из курса биологии ученикам известно, что окисление глюкозы кислородом в живых организмах выступает в качестве важнейшего процесса, при котором глюкоза выступает в качестве субстрата для получения энергии. Для протекания этого процесса необходимо присутствие ферментов, например глюкозооксидазы, катализирующих процесс окисления за счет транспорта протонов и электронов.

Использование предложенного эксперимента на уроке может сопровождаться решением расчетных задач. Например, достаточно легко можно рассчитать объем кислорода, необходимый для окисления используемого количества глюкозы по пути, описываемому уравнение химической реакции:



$$V(\text{O}_2) = \frac{0,2 \text{ г} \times 0,5 \times 22,4 \text{ л/моль}}{180 \text{ г/моль}} = 0,012 \text{ л, или } 12 \text{ мл.}$$

В результате выполнения расчетов ученик может прийти к выводу о недостатке кислорода в системе, что вызывает необходимость периодически открывать пробирку для пополнения недостатка кислорода.

Проведение таких опытов может лечь в основу организации исследовательского эксперимента обучающихся. Например, воз-

можно изучение влияния структуры углеводов на скорость и время изменения окраски растворов. Так, отдельные эксперименты с использованием в качестве восстановителей углеводов с карбонильной группой (восстанавливающих сахаров), отличных от глюкозы, показали, что замена углевода приводит к изменению скорости и продолжительности реакции. Также в качестве восстановителей могут быть использованы различные марки меда или инвертированные сахара. Объектом исследования может стать проведение процессов в разных растворителях. Например, показано, что аналогичные реакции могут протекать не только в водных растворах, но и при использовании в качестве растворителей этилового спирта или диметилсульфоксида.

Такой эксперимент может быть также использован при организации исследований, связанных с изучением кинетических закономерностей протекания химических процессов (скорость химической реакции, порядок реакции). Так, установлено, что окисление глюкозы в данном случае относится к реакциям первого порядка для концентраций щелочи, метиленового синего и глюкозы, но нулевого порядка по отношению к кислороду.

На основе графика Аррениуса, демонстрирующего зависимость натурального логарифма времени обесцвечивания от величины, обратной абсолютной температуре системы, может быть рассчитана энергия активации процесса окисления. Скорость самой медленной (лимитирующей) стадии этого процесса не зависит от концентрации кислорода, в результате чего величина времени, необходимого для полного расходования кислорода, обратно пропорциональна константе скорости реакции. Таким образом, график Аррениуса должен иметь линейный вид (Habibi et al. 2024). Подобные работы могут быть использованы не только при организации исследовательской деятельности обучающихся, но и при их подготовке к участию в предметных олимпиадах по химии и биологии разного уровня.

Заключение

В рамках изучения органической химии на уровне профильной школы вопросы, направленные на изучение химии углеводов, относятся к одним из наиболее сложных, что связано с наличием в структуре молекулы большого набора функциональных групп. Визуализация химических свойств через демонстрацию ярких и интересных экспериментов, позволяющих продемонстрировать химические свойства углеводов, в том числе путем создания проблемной ситуации, способствует развитию творческого мышления, необходимого для грамотного построения выводов через наблюдения, а также более легкому абстрактному представлению о взаимосвязи свойств углеводов со структурными особенностями молекул через наглядные образы.

Как правило, при проведении в рамках школьного курса химических экспериментальных работ, связанных с использованием индикаторов, практически не обращается внимание на участие последних в химической реакции. Применение описанных экс-

периментов является хорошим методическим приемом демонстрации роли индикатора как полноценного участника химической реакции, визуальный эффект которой связан в том числе с изменением химической структуры вещества-индикатора.

Таким образом, применение описанных химических экспериментов, связанных с изучением процессов окисления глюкозы кислородом воздуха, может рассматриваться в качестве методического приема, направленного на развитие творческого мышления обучающихся, расширения представлений о химических свойствах углеводов, а также об участии веществ-индикаторов в протекании химической реакции на основе ярких и необычных визуальных эффектов химической реакции. Использование подобных работ в качестве демонстрации может выступать как методический прием сопровождения исследовательской деятельности обучающихся, направленный на поиск проблемы исследования, формулировку темы и дальнейшее планирование действий, способствующих получению конечного результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башмаков, В. Я. (2017) Об окислительно-восстановительных реакциях в органической химии. *Химия в школе*, № 1, с. 40–44.
- Бишоп, Э. (ред.). (1976) *Индикаторы: в 2 т. Т. 2.* М.: Мир, 446 с.
- Волкова, С. А. (2017) О развитии умения составлять уравнения ОВР. *Химия в школе*, № 10, с. 22–26.
- Иванова, М. А., Кононова, М. А. (1969) *Химический демонстрационный эксперимент. Руководство для ассистентов и лаборантов вузов.* М.: Высшая школа, 248 с.
- Кузнецова, Л. В., Пашкова, Л. И., Власенко, К. К. (2012) Особенности окислительно-восстановительных реакций органических соединений. *Химия в школе*, № 9, с. 26–30.
- Наянова, Е. В., Елиашева, Е. В., Сергеев, Г. М. и др. (2015) Редокс-свойства метиленового голубого как перспективного фотометрического реагента для определения галогенных окислителей. *Аналитика и контроль*, т. 19, № 2, с. 154–160. <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.2.005>
- Новошинский, И. И., Новошинская Н. С. (2024) Об изучении особенностей реакций в органической химии. *Химия в школе*, № 6, с. 14–19.
- Раткевич, Е. Ю., Базаева, М. Г., Голубева, Р. М. и др. (2012) Об использовании понятия «степень окисления» в курсе химии средней школы. *Химия в школе*, № 4, с. 8–12.
- Сабирова, Л. М. (2021) Развитие системы понятий об окислительно-восстановительных реакциях в школьном курсе органической химии. *Science Time*, № 5 (89), с. 43–46.
- Шалашова, М. М. (1998) *Непрерывность и преемственность в развитии системы понятий об окислительно-восстановительных реакциях в школьном курсе органической химии. Автореферат диссертации на соискание степени кандидата педагогических наук.* М., МПГУ, 17 с.
- Dutton, F. B. (1960) Methylene blue — Reduction and oxidation. *Journal of Chemical Education*, vol. 37, no. 12, article A799. <https://doi.org/10.1021/ed037pa799.1>

Fernández-Pérez, A., Marbán, G. (2020) Visible light spectroscopic analysis of methylene blue in water; what comes after dimer? *ACS Omega*, vol. 5, no. 46, pp. 29801–29815. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03830>

Habibi, S. C., Bloom, B. K., Sjöblom, A. E. et al. (2024) Teaching kinetics of the traffic light reaction. *Journal of Chemical Education*, vol. 101, no. 6, pp. 2505–2512. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c01179>

Shakhashiri, B. Z. (1985) *Chemical Demonstrations: In 5 vols. Vol. 2. A Handbook for Teachers of Chemistry*. Madison: University of Wisconsin Press, 312 p.

Tardivo, J. P., Del Giglio, A., de Oliveira, C. S. et al. (2005) Methylene blue in photodynamic therapy: From basic mechanisms to clinical applications. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, vol. 2, pp. 175–191. [https://doi.org/10.1016/S1572-1000\(05\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S1572-1000(05)00097-9)

REFERENCES

- Bashmakov, V. Ya. (2017) Ob okislitel'no-vosstanovitel'nyh reaktsiyakh v organiceskoy khimii [On redox reactions in organic chemistry]. *Khimiya v shkole*, no. 1, pp. 40–44. (In Russian)
- Bishop, E. (ed.). (1976) *Indikatory: v 2-kh t. T. 2 [Indicators: In 2 vols. Vol. 2]*. Moscow: Mir Publ., 446 p. (In Russian)
- Dutton, F. B. (1960) Methylene blue — Reduction and oxidation. *Journal of Chemical Education*, vol. 37, no. 12, article A799. <https://doi.org/10.1021/ed037pa799.1> (In English)
- Fernández-Pérez, A., Marbán, G. (2020) Visible light spectroscopic analysis of methylene blue in water; what comes after dimer? *ACS Omega*, vol. 5, no. 46, pp. 29801–29815. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03830> (In English)
- Habibi, S. C., Bloom, B. K., Sjöblom, A. E. et al. (2024) Teaching kinetics of the traffic light reaction. *Journal of Chemical Education*, vol. 101, no. 6, pp. 2505–2512. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c01179> (In English)
- Ivanova, M. A., Kononova, M. A. (1969) *Khimicheskij demonstratsionnyj eksperiment. Rukovodstvo dlya assistentov i laborantov vuzov [Chemical demonstration experiment. a manual for university assistants and laboratory technicians]*. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 248 p. (In Russian)
- Kuznetsova, L. V., Pashkova, L. I., Vlasenko, K. K. (2012) Osobennosti okislitel'no-vosstanovitel'nykh reaktsij organiceskikh soedinenij [Features of redox reactions of organic compounds]. *Khimiya v shkole*, no. 9, pp. 26–30. (In Russian)
- Nayanova, E. V., Elipasheva, E. V., Sergeev, G. M. et al. (2015) Redoks-svojstva metilenovogo golubogo kak perspektivnogo fotometricheskogo reagenta dlya opredeleniya galogenennyh okislitelej [Redox properties of methylene blue as a promising photometric reagent for the determination of halogen oxidants]. *Analitika i kontrol'*, vol. 19, no. 2, pp. 154–160. <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.2.005> (In Russian)
- Novoshinskij, I. I., Novoshinskaya N. S. (2024) Ob izuchenii osobennostej reaktsij v organiceskoy khimii [On studying the features of reactions in organic chemistry]. *Khimiya v shkole*, no. 6, pp. 14–19. (In Russian)
- Sabirova, L. M. (2021) Razvitiye sistemy ponyatij ob okislitel'no-vosstanovitel'nykh reaktsiyakh v shkol'nom kurse organiceskoy khimii [Development of the system of concepts on redox reactions in the school course of organic chemistry]. *Science Time*, no. 5 (89), pp. 43–46. (In Russian)
- Shakhashiri, B. Z. (1985) *Chemical Demonstrations: In 5 vols. Vol. 2. A Handbook for Teachers of Chemistry*. Madison: University of Wisconsin Press, 312 p. (In English)
- Shalashova, M. M. (1998) *Nepreryvnost' i preemstvennost' v razvitiu sistemy ponyatij ob okislitel'no-vosstanovitel'nyh reaktsiyakh v shkol'nom kurse organiceskoy khimii [Continuity and Succession in the Development of the System of Concepts on Redox Reactions in the School Course of Organic Chemistry]. Extended abstract of PhD dissertation (Biology)*. Moscow, Moscow Pedagogical State University, 17 p. (In Russian)
- Ratkevich, E. Yu., Bazaeva, M. G., Golubeva, R. M. et al. (2012) Ob ispol'zovanii ponyatiya "stopen' okisleniya" v kurse khimii srednej shkoly [On the use of the concept of "oxidation state" in the high school chemistry course]. *Khimiya v shkole*, no. 4, pp. 8–12. (In Russian)
- Tardivo, J. P., Del Giglio, A., de Oliveira, C. S. et al. (2005) Methylene blue in photodynamic therapy: From basic mechanisms to clinical applications. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, vol. 2, pp. 175–191. [https://doi.org/10.1016/S1572-1000\(05\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S1572-1000(05)00097-9) (In English)
- Volkova, S. A. (2017) O razvitiu umeniya sostavlyat' uravneniya OVR [On developing the skill of Composing Redox Reaction Equations]. *Khimiya v shkole*, no. 10, pp. 22–26. (In Russian)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СУТЯГИН Андрей Александрович — *Andrey A. Sutyagin*

Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, Челябинск, Россия.
South-Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk, Russia.

SPIN-код [7868-8359](#), Scopus AuthorID: [6603478238](#), ORCID [0000-0002-5181-0009](#), e-mail: sutyaginaa@cspu.ru

Кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой химии, экологии и методики обучения химии.

МЕНЬШИКОВ Владимир Владимирович — *Vladimir V. Menshikov*

Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, Челябинск, Россия.
South-Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk, Russia.

SPIN-код [4569-3851](#), Scopus AuthorID: [58002007800](#), ORCID [0000-0002-7386-3056](#), e-mail: menshikoff@mail.ru

Доцент кафедры химии, экологии и методики обучения химии.

Поступила в редакцию: 7 февраля 2025.

Прошла рецензирование: 17 октября 2025.

Принята к печати: 1 декабря 2025.