

УДК 5(07):57(07):54(07)

КАТЕГОРИЯ «СОПРЯЖЕНИЕ» КАК МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ДЛЯ ПОНИМАНИЯ СУЩНОСТИ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ

Третьякова И.А.*Челябинский государственный педагогический университет,
Челябинск, e-mail: tretyakovaia10101966@mail.ru*

Раскрывается методологическая функция категории «сопряжение» на примере окислительно-восстановительных реакций, сыгравших важнейшую роль в зарождении и в последующей эволюции жизни на Земле. Анализируются проблемы в формировании и развитии понятия «окислительно-восстановительная реакция» в школьных курсах химии и общей биологии, предложены конкретные рекомендации для их устранения. Усвоение категории сопряжения как важнейшей внутренней стороны взаимодействия учащимися и студентами на молекулярном уровне и сознательное ее применение при формировании и развитии понятий об окислительно-восстановительных реакциях, которые являются одним из механизмов внутреннего взаимодействия между химической и биологической формами движения материи, позволит одновременно вооружить их и эффективным методологическим средством познания, способствующим формированию научного мировоззрения. Выявление генетической связи понятия «сопряжение» с философской категорией «взаимодействие» продвигает научное (рациональное) знание вперед.

Ключевые слова: взаимодействие, сопряженные реакции, категория, методология, естествознание

CATEGORY «PAIR» AS A METHODOLOGICAL BASIS FOR UNDERSTANDING THE ESSENCE OF REDOX REACTIONS

Tretyakova I.A.*Chelyabinsk state pedagogical University, e-mail: tretyakovaia10101966@mail.ru*

Revealed methodological function category «pair» on the example of redox reactions, which played a major role in the origin and subsequent evolution of life on Earth. The author analyzes the problems in the formation and development of the concept of redox reaction» in school courses chemistry and General biology, offered concrete recommendations for their elimination. Assimilation category mates as the most important internal aspects of the interaction between students and students on molecular level and conscious of its application in the formation and development of concepts about redox reactions, which are one of the mechanisms of internal interaction between chemical and biological forms of motion of matter, will allow to equip them and effective methodological tool of knowledge, contributing to the formation of the scientific worldview. Identifying the genetic relations of the concept of «pair» with philosophic category of «interaction» promotes research (rational) knowledge forward.

Keywords: interaction, conjugated reactions, category, methodology, nature-knowledge

В предыдущем исследовании нами дано естественнонаучное и философское обоснование сущности понятия «сопряжение» как одной из внутренних сторон взаимодействия, которое послужило основой для рекомендации возведения данного понятия в ранг естественнонаучной категории познания неживой и живой природы [6]. Одним из важнейших механизмов, отражающих и конкретизирующих внутреннюю (содержательную) сторону взаимодействия на молекулярном уровне, является механизм сопряжения окислительных и восстановительных реакций, сыгравших важнейшую роль в зарождении и в последующей эволюции жизни на Земле. Сопряженными называют «химические реакции, которые протекают только при наличии хотя бы одного общего реагента, причем одна из реакций возбуждает или ускоряет другую» [5, с. 1239]. Суть явления сопряжения в данном случае проявляется в том, что самопроизвольно протекающая в системе химическая реакция индуцирует протекание в той же системе другой химической реакции, неосуществимой в отсутствие первой. Такое сопряжение

химических реакций иначе называют *химической индукцией*. Явление химической индукции было подробно изучено Н.А. Шиловым на примере сопряженных реакций окисления. Им же было дано объяснение этому явлению, согласно которому химическая индукция обусловлена тем, что сопряженные реакции протекают через общие активные промежуточные вещества [7].

Сопряженные реакции представляют собой целостную систему, в которой можно выделить три составляющих компонента:

1) индуктор – компонент, взаимодействие которого с одним из исходных веществ индуцирует превращение другого исходного вещества;

2) актор – исходное вещество, реагирующее с индуктором;

3) акцептор – компонент, который может вступать в реакцию с актором только в условиях химической индукции. В такой системе сопряженных реакций можно выделить два направления: индуцирующее направление – взаимодействие актора с индуктором в отсутствие акцептора –

и индуцируемое направление – реакция превращения акцептора.

Явление химической индукции лежит в основе важнейших физиолого-биохимических процессов, сопровождающихся увеличением энергии Гиббса системы (G), что позволяет клетке получать продукты в концентрациях, значительно превышающих термодинамически равновесные. Это касается, прежде всего, синтеза таких жизненно значимых биополимеров, как белки и нуклеиновые кислоты. Биосинтез этих соединений осуществляется сопряженно с реакцией гидролиза одной из пирофосфатных связей молекулы аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ). Этот процесс сопровождается уменьшением энергии Гиббса и служит универсальным источником энергии для осуществления множества разнообразных химических процессов в клетке. В то же время процессы биологического окисления, являющиеся первичным источником энергии клеток, проходят сопряженно с обратной реакцией – присоединением остатка фосфорной кислоты к аденозиндифосфорной кислоте с образованием АТФ, что сопровождается увеличением энергии Гиббса. Следовательно, чтобы в системе могла происходить реакция, сопровождающаяся увеличением G , необходимо совершать работу над системой, т.е. необходимо наличие источника работы. По отношению к индуцируемой реакции таким источником может служить индуцирующая реакция, сопровождающаяся уменьшением энергии Гиббса [там же].

Кроме химической индукции активные промежуточные частицы, необходимые для протекания химической реакции, могут быть получены при действии света. Так, свет в фотохимических реакциях фотосинтеза можно рассматривать как индуктор, а фотохимический процесс в целом – как сопряженные процессы химического превращения и превращения энергии квантов видимого света в тепловую или химическую энергию. Процесс начинается с поглощения квантов света дополнительными пигментами (светособирающей антенной) и передачи этой энергии длинноволновым формам хлорофилла (P_{700} и P_{680}), которые входят в состав реакционного центра. В реакционном центре происходит образование первичного восстановителя и окислителя, которые затем иницируют цепь последовательных окислительно-восстановительных реакций, а энергия, которая при этом освобождается, запасается в восстановленном NADPH и АТФ. Такой процесс называется фотосинтетическим фосфорилированием. В функционировании этого процесса мож-

но выделить как минимум два механизма сопряжения:

1) сопряжение возбужденной светом молекулы хлорофилла с фотоокислением воды и восстановлением $NADP^+$ до NADPH;

2) сопряжение светоиндуцируемого транспорта электронов с синтезом АТФ (фотофосфорилирование).

Наличие данных видов сопряжений доказывается опытами с разобщителями.

Подобные сопряженные механизмы имеют место и в процессе окислительного фосфорилирования, протекающем при участии компонентов (ферментов) электрон-транспортной цепи (ЭТЦ), встроенных во внутреннюю сопрягающую мембрану митохондрий. Окислительное фосфорилирование было открыто в 1930 г. В.А. Энгельгардтом. Продолжая эти исследования, А. Ленинджер показал, что окисление субстрата и образование АТФ из ADP и фосфорной кислоты при аэробном дыхании сопряжено с переносом электронов по цепи дыхательных ферментов, встроенных во внутреннюю мембрану митохондрий. Электроны поступают в дыхательную цепь от восстановленного NADH (или NADPH) и через кофермент Q и последовательно передаются от соединений с более отрицательным окислительно-восстановительным потенциалом к соединениям с более положительным потенциалом. Конечным акцептором электронов в ЭТЦ является кислород, который восстанавливается до кислорода воды. Таким образом, процесс окисления субстрата кислородом опосредован серией сопряженных окислительно-восстановительных реакций компонентов ЭТЦ. В тех местах, где разность окислительно-восстановительных потенциалов значительна, освобождается наибольшая порция энергии, которая используется для синтеза АТФ из ADP и фосфорной кислоты. Утилизация высвобождаемой энергии происходит в пунктах энергетического сопряжения, где выделяющаяся энергия запасается в форме электрохимического градиента ионов водорода ($\Delta\mu H^+$), которая далее расходуется для синтеза АТФ. Электрохимический градиент протонов в данном механизме выступает как посредник между двумя формами энергии, иначе говоря, он сопрягает эти энергетические процессы и позволяет понять внутреннюю сторону их взаимодействия с энергетической точки зрения. Трансмембранные электрохимические потенциалы ионов водорода могут служить источником энергии не только для синтеза АТФ, но и для транспорта веществ, движения бактериальных клеток и других энергозависимых процессов. Это указывает на то,

что $\Delta\mu\text{H}^+$ сопряжен не только с синтезом АТР, но и другими жизненно важными процессами клеточного метаболизма.

В структурном плане сопряжение диффузии протонов назад через внутреннюю мембрану митохондрии с синтезом АТР осуществляется с помощью АТРазного комплекса, получившего название *фактора сопряжения* F_1 . При создании определенного градиента протонов F_1 функционирует как АТР-синтетаза. При отсутствии сопряжения между электрохимическим потенциалом ионов H^+ и синтезом АТР энергия, освобождающаяся в результате обратного транспорта ионов H^+ в матрикс, может превращаться в теплоту. *Верность центрального постулата хемиосмотической теории П. Митчелла: электронпереносящие цепи митохондрий, хлоропластов и бактерий сопряжены с системой синтеза АТР через разность электрохимических потенциалов протонов на сопрягающих мембранах подтверждена опытами с кислотно-основными переходами и опытами с разобщителями.*

В качестве сопрягающих компонентов в работе ЭТЦ хлоропластов и митохондрий служат такие коферменты, как NADP, NAD, FAD и FMN, которые играют роль промежуточных переносчиков электронов, а также атомов водорода. NAD и NADP служат коферментами в ферментативных окислительно-восстановительных реакциях. Пиридиновое кольцо никотинамида этих коферментов способно претерпевать обратимое окисление. В свою очередь изоаллоксазиновое кольцо FMN и FAD также претерпевает обратимое окислительно-восстановительное превращение. FMN и FAD служат простегическими группами для определенного класса окислительно-восстановительных ферментов, известных под названием флавинодегидрогеназ.

Проведенный теоретический анализ свидетельствует, что принцип сопряжения необходимо рассматривать как одну из внутренних сторон взаимодействия раскрывающих сущность взаимопревращения объектов и явлений природы. Главная же задача исследователя состоит в выявлении того сопрягающего фактора, через который происходит это взаимодействие, это превращение. В нашем исследовании работа этого принципа показана на примере сопряженных окислительно-восстановительных реакций, которые играют ключевую роль в механизмах взаимодействия вещества и энергии в интактных клетках.

Осмысление и понимание сущности сопряжения как важнейшей стороны взаимодействия дает основание для предположения, что данное понятие может быть

возведено в ранг важнейшей естественнонаучной категории познания неживой и живой природы. В образовательной же области категория сопряжения может выступать как современный принцип обучения и воспитания учащихся и студентов.

Выход молекулярной биологии на передовые позиции биологической науки во многом должен определять стратегию содержания биологического образования не только в вузе, но и в школе в силу того, что основополагающим принципом его содержания является принцип научности. Отсюда следует, что изучение и понимание процессов на молекулярном и субмолекулярном уровнях в курсе общей биологии возможно только на методологической основе диалектики и содержательной основе курсов физики, химии. При этом биология не только должна опираться на понятия, законы и теории этих курсов, но и развивать (углублять) их при изучении объектов и явлений живой природы. Только в этом случае будет реализован главный принцип теории развития понятий, согласно которому понятия формируются в развитии и взаимосвязи.

При изучении конкретных явлений природы в предметах естественнонаучного цикла перед учащимися обнажается реальная диалектика развития материи. Понимание ее сущности будет возможно, если обобщить конкретно-научные и философские представления о мире. Особое значение при этом приобретает овладение философскими и естественнонаучными категориями, которые составляют ядро научной картины мира. При решении обозначенной выше проблемы данная стратегия позволит усвоить методологический потенциал категории сопряжения, которая отражает одну из внутренних сторон взаимодействия, и использовать его для понимания сущности окислительно-восстановительных реакций, которые лежат в основе молекулярных механизмов метаболизма растительных и животных клеток.

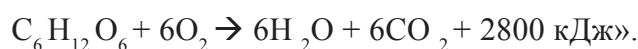
С методологической и методической точек зрения очень важно проследить развитие и взаимосвязь основных теорий, законов и понятий, которые отражают эволюцию (усложнения и разнообразия) вещества как одной из форм существования материи. Одним из основных понятий химии, выполняющих методологическую функцию при изучении физиолого-биохимических процессов в интактной клетке на молекулярном уровне, является понятие «окислительно-восстановительная реакция». С философской точки зрения эта диалектическая пара представляет несомненный интерес, так как, обладая двойственной реакционной

способностью, окислительно-восстановительные реакции во многом определяют эволюцию вещества, подчиняясь основному закону природы – единства и борьбы противоположностей.

Понятие «окислительно-восстановительная реакция» начинают формировать в школьном курсе неорганической химии и его содержание увязывают только с принятием и отдачей электронов атомами или ионами, которые участвуют в реакции. Данный тип окислительно-восстановительных реакций является исключительно важным, но не единственным. При изучении органической химии учащиеся сталкиваются с другим типом окислительно-восстановительной реакции – отдачей и принятием атомов водорода, однако эти реакции называются – дегидрирования-гидрирования [2, с. 44–46]. Авторы школьного учебника органической химии, по-видимому, допускают методическую (методологическую) ошибку, так как не показывают, что реакции дегидрирования-гидрирования также относятся к типу окислительно-восстановительных реакций, тем самым не развивая данное понятие. На этом особо заостряет внимание известный биохимик А. Ленинджер: «Окислительно-восстановительными называются такие реакции, в процессе которых

происходит перенос электронов от донора электронов (восстановителя) к акцептору электронов (окислителю). В некоторых окислительно-восстановительных реакциях перенос электронов осуществляется путем передачи атомов водорода; таким образом, дегидрирование и окисление представляют собой по существу два эквивалентных процесса» [3, с. 425].

Отмеченный выше недостаток, касающийся развития понятия «окислительно-восстановительная реакция» в курсе органической химии, существенно сказывается на использовании и развитии данного понятия в курсе общей биологии, и в первую очередь, при изучении таких процессов, как катаболизм и анаболизм. Остановимся на конкретном примере неумелого использования понятия «окислительно-восстановительная реакция» при изучении процесса катаболизма в учебнике общей биологии под редакцией В.Б. Захарова [4, с. 123–126]. Основу катаболизма, как известно, составляет процесс дыхания, и авторы учебника вполне обоснованно приводят общее уравнение этого процесса. Комментарий же к нему следующий: «При расщеплении глюкозы энергия выделяется поэтапно при участии ряда ферментов согласно итоговому уравнению:



Учитывая все вышесказанное, более уместным был бы следующий комментарий. С химической точки зрения дыхание – это окислительно-восстановительный процесс, при котором происходит окисление углерода углеводов до углерода углекислого газа и восстановление свободного кислорода до кислорода воды. Энергия, освобождаемая в этих реакциях, используется на синтез АТФ из АДФ и Р_i.

Существенные пробелы в формировании понятий «дыхание», «фотосинтез» и метаболизма в целом во многом детерминированы отсутствием в содержании материала понятия «NAD» («NADP»). Поэтому авторы учебника по общей биологии, рассматривая анаэробный этап дыхания – гликолиз, вынуждены прибегать к менее научным терминам: «...в мышцах в результате анаэробного дыхания молекула глюкозы распадается (следовало сказать окисляется, прим. автора) на две молекулы пировиноградной кислоты (C₃H₄O₃), которые затем восстанавливаются в молочную кислоту (C₃H₆O₃)». По-видимому, данной фразой авторы учебника запутывают не только учащихся, но и самих себя в силу того, что подобная интерпретация дыхания является некорректной, так как используются не со-

пряженные понятия, распад – восстановление. Если следовать законам формальной логики, то понятие «распад» должно использоваться в паре с понятием «синтез», а понятие «восстановление» – с понятием «окисление». Кроме того, химической наукой доказано, что реакции окисления – восстановления являются сопряженными и они во многом обуславливают друг друга.

В научном стиле и смысле упомянутая фраза учебника по общей биологии должна звучать так: ... в мышцах в результате анаэробного дыхания молекула глюкозы окисляется до двух молекул пировиноградной кислоты. Отнятые от нее водороды идут на восстановление NAD⁺ до NADH. В дальнейшем судьба пировиноградной кислоты может быть двоякой: при наличии кислорода она будет окисляться до углекислого газа (с образованием промежуточных метаболитов); при его отсутствии – восстанавливаться до молочной кислоты, используя для этого водороды NADH, которая при этом окисляется до NAD⁺.

Вышесказанное позволяет заключить, что важнейшее понятие «окислительно-восстановительная реакция», которое закладывается в курсе неорганической химии, в дальнейшем не развивается ни в органической химии, ни в курсе биологии.

Это является грубейшей методологической ошибкой, так как нарушается основной принцип формирования понятий, согласно которому понятия формируются в развитии и взаимосвязи [1, с. 86].

Приведенные факты свидетельствуют о непонимании авторами учебников методологической роли понятия сопряжения, содержание которого во многом определяет применение и развитие понятия «окислительно-восстановительные реакции», которые только во взаимной связи между собой (сопряжении) могут играть важнейшую методологическую роль в превращении вещества и энергии во всех типах клеток, существующих на Земле.

Понятие «сопряжение» в узком смысле этого слова достаточно часто используется в естествознании в целом и в частности в области физики, химии и биологии: «сопряженные точки», «сопряженные π -электроны», «сопряженные химические связи», «сопряженные реакции» «энергетическое сопряжение», «сопрягающий фактор», «сопрягающие мембраны», «сопрягающие органеллы» и т.д. Однако во всех этих частных применениях (значениях) этого понятия оно не несет методологической нагрузки. И только после того, как будут раскрыты генетические связи понятия сопряжения с философскими категориями (в нашем случае с категорией взаимодействия), данное понятие будет выполнять функции естественнонаучной категории, обозначая общую закономерность для всех объектов природы, понимание которой продвигает научное (рациональное) знание вперед. Признание сопряжения как важнейшей внутренней стороны взаимодействия между структурными элементами материи, которое приводит к созданию качественно новой системы, позволяет перенести этот принцип в образовательную область и использовать его как методологическую основу (дидактический принцип) для выявления взаимосвязи между фундаментальными естественнонаучными понятиями, которые будут способствовать формированию научной картины мира.

Список литературы

1. Верзилин Н.М. Общая методика преподавания биологии: учеб. для студ. биол. фак. пед. ин-тов / Н.М. Верзилин, В.М. Корсунская. – М.: Просвещение, 1972. – 368 с.
2. Габриелян О.С. Химия, 10 класс. Базовый уровень: учеб. для общеобразоват. учреждений. – 8-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2012. – 191 [1].
3. Ленинджер А. Биохимия; пер. с англ.; под ред. А.А. Баева и Я.М. Варшавского. – М.: Мир, 1974. – 959 с.
4. Общая биология: учеб. для 10–11 кл. общеобр. учеб. заведений / В.Б. Захаров, С.Г. Мамонов (лil Мамонтов?), Н.И. Сонин. – 3-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2000. – 624 с.
5. Советский энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Сов. энцикл., 1985. – 1600 с.
6. Третьякова И.А.. Сопряжение как внутренняя сторона взаимодействия и методология познания // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11 (9). – С. 1929–1933.
7. Эмануэль Н.М. Курс химической кинетики / Н.М. Эмануэль, Д.Г. Кнорре. – 4 изд. – М., 1984.

References

1. Versilin N.M. General methodology of biology teaching: textbook. for stud. Biol. FAK. PED. in-tov / N.M. Versilin, V.M. Korsunsky. M.: Education, 1972. 368 p.
2. Gabrielyan O.S. Chemistry, grade 10. Base level: textbook. for OBSHNEOBRAZOVATEL. establishment of institutions. 8-e Izd., the stereotype. M: bustard, 2012. 191.
3. Leninger A. Biochemistry; Per. s angl.; Ed. by A.A. Baev and A.M. Options stavskogo. M.: Mir, 1974. 959 p.
4. General biology: textbook. for 10-11 class obser. textbook. institutions / V.B. have been Zakharov, 2008 Mamonov (Lil Mammoths?) N. Sonin. 3-e Izd., the stereotype. M.: bustard, 2000. 624 p.
5. The Soviet encyclopaedic dictionary / Ed. Ed. by A.M. Prokhorov. 3-e Izd. M: Sov. day., 1985. 1600 p.
6. Tret'yakov I.A. Pairing as the inner side of interaction and methodology of cognition // Fundamental research. 2013. no. 11 (9). pp. 1929–1933.
7. Emanuel N. M, the Rate of chemical kinetics / N.M. Emanuel, D.G. Knorre. the 4 ed., M., 1984.

Рецензенты:

Похлебаев С.М., д.п.н., профессор кафедры ботаники, экологии и методики обучения биологии, Челябинский государственный университет, г. Челябинск;

Красуцкий Б.В., д.б.н., профессор, Челябинский государственный университет, г. Челябинск.

Работа поступила в редакцию 30.04.2014.