

## ARBUSOV'S REACTION

V. V. MOSKVA

*The history of discovery and possibilities of synthesis of fundamental reaction in chemistry of organophosphorus compounds – Arbusov's reaction is considered. Influence of different factors on chemistry of the process has been estimated.*

**Рассмотрены история открытия и синтетические возможности основной реакции в химии фосфорорганических соединений – реакции Арбузова. Дана оценка влияния различных факторов на химизм процесса.**

## РЕАКЦИЯ АРБУЗОВА

В. В. МОСКВА

Казанский государственный технологический университет

### ВВЕДЕНИЕ

Химикам-органикам известно несколько сот именных реакций. Каждая их них – знаменательная веха в развитии органической химии. Но даже в списке именных реакций есть звезды первой величины, оказавшие революционное влияние на развитие целых направлений в органической химии. Именно такое почетное место по праву и занимает реакция Арбузова. Без преувеличения можно считать, что монументальное здание химии органических соединений фосфора построено на фундаменте, имя которому – реакция Арбузова.

Александр Ерминингельдович Арбузов (1877–1968) закончил Казанский университет в 1900 году и в 1905 году выполнил свое первое самостоятельное научное исследование, которое защитил в Казанском университете как магистерскую диссертацию на тему “О строении фосфористой кислоты и ее производных”. Именно это исследование дало органической химии реакцию Арбузова. С 1911 года А.Е. Арбузов более чем на полвека становится главой знаменитой Казанской химической школы.

Несмотря на то что в научном активе А.Е. Арбузова есть много глубоких в теоретическом плане и важных для практики разработок, вершиной его научного творчества остается первая самостоятельная работа. Именно она обессмертила имя автора. Свой научный Эверест А.Е. Арбузов покорил с первой попытки. Уже более 90 лет на страницах периодических научных изданий тысячи раз повторяются “перегруппировка Арбузова”, “изомеризация Арбузова”, “реакция Арбузова” – синонимы одного и того же открытия. Наиболее цитируемой в химии фосфорорганических соединений оказалась магистерская диссертация А.Е. Арбузова, в которой было описано превращение триалкилфосфитов под влиянием галоидных алкилов в алкилфосфонаты. Именно эта работа дала мировой химической науке реакцию с неисчерпаемыми синтетическими возможностями.

Начиная исследование, А.Е. Арбузов тщательно проанализировал результаты предшественников, среди которых были очень авторитетные химики того времени. Одной из наиболее важных причин их неудач оказалось недостаточное внимание к чистоте препаратов: ни один из предшественников не сумел приготовить чистых эфиров фосфористой кислоты. Под видом этих соединений, как позднее выяснилось, описывались смеси неопределенного состава. И первое, с чего начал А.Е. Арбузов, – это разработка препаративных методов получения ин-

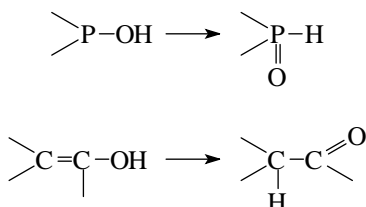
дивидуально чистых эфиров фосфористой кислоты и поиск надежных тестов, позволяющих строго различать производные трех- и пентавалентного фосфора. Были разработаны методика синтеза полных алкиловых эфиров фосфористой кислоты действием треххлористого фосфора на алколяты спиртов, а также оригинальная методика получения последних.

Успешно продвигалась работа по поиску универсального реактива для распознавания производных трех- и пентавалентного фосфора. После настойчивых поисков было найдено, что полные эфиры фосфористой кислоты (начиная с ранее известного фенилового эфира, а затем все синтезированные триалкиловые эфиры) реагируют с одногалогидными солями меди, образуя характерные продукты присоединения. Именно одногалогидным солям меди суждено было стать тонким инструментом для распознавания и отличия соединений трехвалентного фосфора от соединений пентавалентного.

Все несомненные производные пентавалентного фосфора при взаимодействии с одногалогидными солями меди продуктов присоединения не образовывали, что позволило сделать заключение о строении фосфористой кислоты и ее производных: так как кислые эфиры фосфористой кислоты и сама фосфористая кислота ни при обыкновенной температуре, ни при нагревании в соединении с одногалогидными солями меди не вступают, то поэтому эти соединения должны быть отнесены к производным пентавалентного фосфора. Следовательно, они должны иметь следующее строение:



Строго установленный экспериментальный факт дал право сделать еще одно важное заключение: соединения с гидроксильной группой при трехвалентном фосфоре неспособны к существованию, в условиях же их образования превращаются в изомерные им производные пентавалентного фосфора. Поведение таких соединений уместно сравнивать с известной в органической химии изомеризацией енолов в соответствующие карбонильные соединения (альдегиды или кетоны):



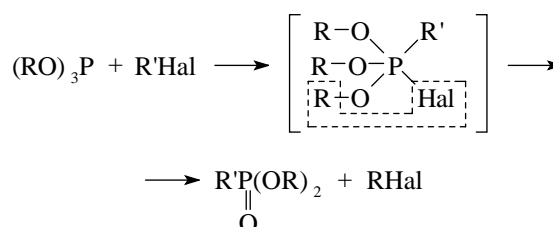
Отмеченное является первым примером химического подобия аналогичных производных трехвалентного фосфора и олефинов, многочисленные примеры которого позже широко обсуждались в литературе.

Таким образом, вопрос о строении фосфористой кислоты и ее производных был решен: сама кислота и ее кислые эфиры имеют структуру, включающую пентавалентный фосфор, полные эфиры — производные трехвалентного фосфора. Казалось, можно поставить точку. Но не менее важным вопросом становилось для Арбузова выяснение обстоятельств, при которых из соединений трехвалентного фосфора получают соединения пентавалентного фосфора. Интуитивно ученый чувствовал, что синтезированные им триалкиловые эфиры фосфористой кислоты являются ключом к разгадке новых тайн. И интуиция его не обманула. Предстояло сделать еще один шаг к раскрытию строения производных фосфористой кислоты. Этим шагом было открытие фундаментальной реакции в химии органических производных фосфора, получившей имя ее автора.

## КЛАССИЧЕСКИЙ ВАРИАНТ РЕАКЦИИ АРБУЗОВА

Получив в чистом виде полные эфиры фосфористой кислоты, А.Е. Арбузов решил изучить их поведение в присутствии галоидных алкилов. Почему именно галоидных алкилов? Потому что следы галоидных алкилов, как правило, получались у всех предшественников в процессе синтеза эфиров фосфористой кислоты.

Оказалось, что при действии галоидных алкилов на полные эфиры фосфористой кислоты последние в мягких условиях превращаются в эфиры алкилфосфоновых кислот, содержащие пентавалентный фосфор. Автором была предложена и экспериментально доказана двухстадийная схема реакции



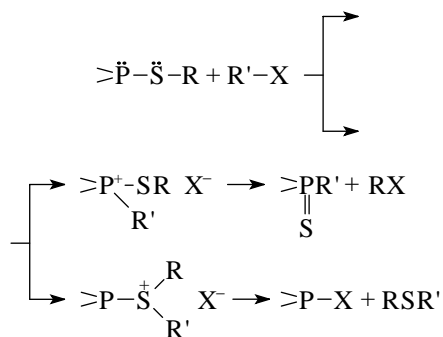
Данная реакция получила название перегруппировки Арбузова или арбузовской изомеризации. Действительно, если радикалы взятых в реакцию галоидного алкила и в эфирных группах исходного фосфита одинаковы, то конечный продукт — алкилфосфонат является изомером исходного фосфита. Если учесть, что для такого превращения требуются лишь каталитические количества галоидного алкила, то говорить об изомеризации вполне правомерно. Однако таких примеров немного. В подавляющем большинстве случаев присоединяемый к атому фосфора с помощью органического галогенида радикал отличается от отщепляющегося от эфирной группы, и конечный продукт реакции не является изомерным исходному эфиру трехвалентного фосфора. Естественно, что в этом случае надо брать

равномолекулярное или даже несколько большее количество органического галогенида.

В последние десятилетия термин “перегруппировка Арбузова” все чаще стал заменяться термином “реакция Арбузова”, так как не всякое превращение, наблюдаемое в рамках этой реакции (в нынешней широкой трактовке), вписывается в понятие перегруппировки в органической химии. Поэтому при дальнейшем изложении материала мы будем пользоваться более современным термином “реакция Арбузова”, хотя до сих пор в научной литературе еще употребляют прежний термин.

В процессе длительного изучения реакций Арбузова были сформулированы обобщения, связывающие влияние структуры исходного эфира трехвалентного фосфора и галогенсодержащего реагента на легкость (и возможность) протекания между ними реакции. Активность производного трехвалентного фосфора зависит от величины электронной плотности (подвижности неподеленной электронной пары) на атоме фосфора. Электронодонорные заместители у атома фосфора, увеличивая электронную плотность на нем, повышают реакционную способность этих соединений с галогенсодержащими соединениями, относящимися к группе электрофильных реагентов. Электроноакцепторные заместители, снижая электронную плотность на атоме фосфора, будут затруднять протекание реакции. В некоторых случаях низкую активность эфира трехвалентного фосфора в реакции Арбузова можно компенсировать повышенной активностью галогенопроизводного.

Если в производном Р(III) наряду с атомом фосфора имеется еще один центр алкилирования, реакция протекает неоднозначно. Так, в случае тиоэфиров Р(III) взаимодействие с галоидными алкилами осуществляется в двух направлениях: по схеме реакции Арбузова и с замещением алкильной группы у трехвалентного фосфора на атом галогена. Это объяснялось возможностью конкурирующего алкилирования атомов фосфора и серы  $\text{>P-S-}$  на первой стадии реакции



В течение нескольких десятков лет в литературе дискутировался вопрос о соотношении этих направлений. По последним данным превалирует направ-

ление по схеме реакции Арбузова, тогда как направление с сохранением координации атома фосфора является незначительным.

Лучшим химическим доказательством образования промежуточных продуктов явились их выделение и последующий распад в соответствии со второй фазой реакции. Природа промежуточных продуктов сложна — они могут представлять собой гамму структур с различной степенью полярности — от ионной (в солях квазифосфониевого основания) до ковалентной. Выделить промежуточный продукт реакции удастся в редких случаях. К изучению механизма реакции широко привлекались физические методы, кинетические и стереохимические исследования.

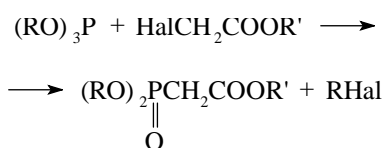
В центре внимания оставался вопрос о природе первой и второй стадий реакций и соотношении их скоростей. Первая стадия — присоединение органического галогенида к эфиру трехвалентного фосфора — не вызвала разногласий. Большинство авторов рассматривали ее как реакцию бимолекулярного нуклеофильного замещения второго порядка. О природе второй стадии реакции — разложении промежуточного продукта присоединения — высказывались различные мнения. Скорее всего, здесь единого мнения не будет, так как имеющиеся данные указывают на возможность протекания реакции по разным механизмам. Нет единого мнения и о соотношении скоростей первой и второй стадии, хотя большинство исследователей определяющей стадией считают первую. Если не вдаваться в детали, суммируя сказанное, можно констатировать, что механизм реакции, данный А.Е. Арбузовым в начале века, в принципе остается верным.

Хотя многообразие вариантов реакции Арбузова определяется как природой эфира Р(III), так и органического галогенида, все же следует признать, что интенсивное накопление экспериментального материала и стремительное расширение границ применимости реакции в большей мере определяются природой реагента. Оказывается, последний может и не содержать галогена.

### ПУТЬ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗАМЕЩЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА

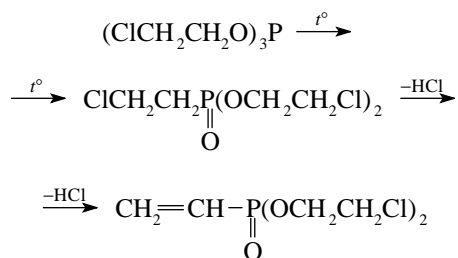
А.Е. Арбузов первым оценил возможности открытой им реакции для присоединения к фосфору любых органических фрагментов как универсального метода направленного синтеза его органических производных. Проиллюстрируем сказанное несколькими примерами синтеза функционально замещенных производных.

Первый шаг в этом направлении сделал автор реакции. Взаимодействием эфиров галогензамещенных кислот с триалкилфосфитами получены эфиры фосфонкарбовых кислот



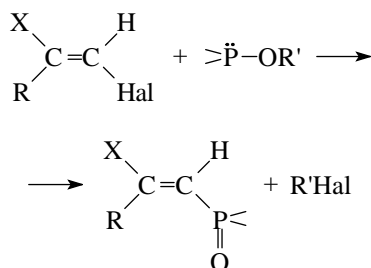
Последние содержат метиленовое звено ( $-CH_2-$ ) между карбоалкоксильной ( $-COOR$ ) и фосфорильной  $\triangleright P=O$  группами и в реакционном отношении оказались аналогами ацетоуксусного эфира. Это открывало путь к получению самых разнообразных фосфорорганических соединений по методам, аналогичным тем, которые применяются в классических синтезах на основе ацетоуксусного эфира.

Реакция Арбузова оказалась удобной для синтеза органических соединений фосфора, содержащих активные функциональные группы. Так, эфиры фосфористой кислоты, содержащие атомы галогена в эфирных радикалах, при нагревании или перегонке претерпевают внутримолекулярную изомеризацию. Получающиеся галогеналкилфосфонаты дегидрогалогенированием могут быть превращены в непредельные производные

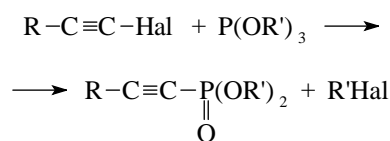


Последние могут быть вовлечены во все реакции, характерные для непредельных углеводородов. Таким образом, реакция Арбузова явилась началом в серии многостадийных превращений.

Синтез непредельных фосфорорганических производных с помощью реакции Арбузова осуществляется довольно часто, однако особый интерес представляет введение в реакцию непредельных галогенидов, содержащих галоген при двойной связи. В этом случае осуществляется непосредственный синтез соединений с атомом фосфора при ненасыщенном центре. Первоначально в реакцию были введены  $\omega$ -бромстиролы, затем другие замещенные галогенэтилены с электроакцепторными группами (X), активирующими винильное положение галогена

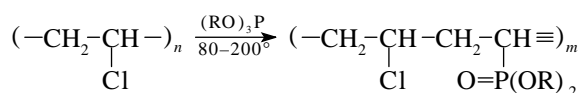


В реакцию Арбузова успешно вовлекаются ацетиленгалогениды

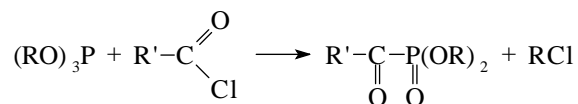


Дигалогензамещенные ацетилены в зависимости от соотношения реагентов могут образовывать моно- и дифосфорилированные ацетилены.

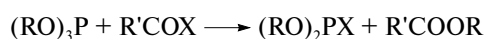
Есть много путей введения фосфора в молекулы высокомолекулярных соединений. Один из них — прямое фосфорилирование карбоцепных полимеров с помощью реакции Арбузова. Примером может служить взаимодействие триэтилфосфита с поливинилхлоридом



Одним из ранних примеров синтеза фосфорилированных карбонильных соединений является реакция триалкилфосфитов с хлорангидридами карбоновых кислот

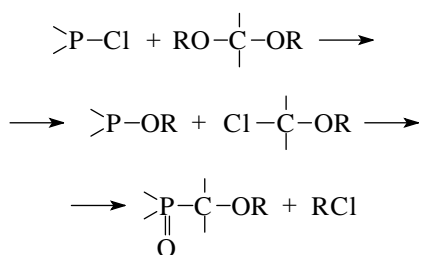


Образующиеся  $\alpha$ -кетофосфонаты (ацилфосфонаты) вступают в большинство реакций, характерных для кетонов. Следует отметить, что реакции эфиров кислот P(III) с ацилгалогенидами могут осложняться за счет взаимодействия продуктов реакции с исходными соединениями, а также протекать без изменения валентности атома фосфора по схеме замещения эфирной группы на атом галогена ацилгалогенида

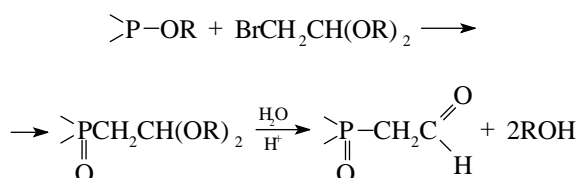


В некоторых случаях тиоэфиров P(III) такое направление реакции становится единственным.

В ряде случаев исходные эфир трехвалентного фосфора и органический галогенид образуются в результате первичных обменных процессов с последующим их взаимодействием по схеме реакции Арбузова. К подобным реакциям относится взаимодействие галогенидов кислот трехвалентного фосфора с ацеталями, кеталями, ортоэфирами



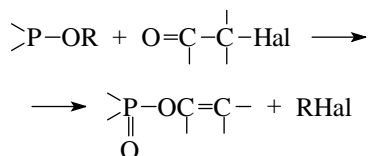
Таким путем удастся вовлечь в реакцию Арбузова малоустойчивые галогеноэфиры, например хлорформаль. Если реагент содержит несколько электрофильных центров, каждый из которых может реагировать с производными трехвалентного фосфора, реакция будет протекать неоднозначно. Для того чтобы направить течение реакции в желаемом направлении, одну из групп необходимо защищать. Такими приемами широко пользуются в органической химии. В качестве примера таких реакций приведем синтез фосфорилированных альдегидов через соответствующие ацетали



Приведенные примеры показывают, что реакция Арбузова является удобным инструментом для синтеза функционально замещенных фосфорорганических соединений. Здесь используются методы фосфорорганики в комбинации с приемами, давно известными в органической химии.

### НОВЫЕ ВИДЫ РЕАКЦИИ АРБУЗОВА

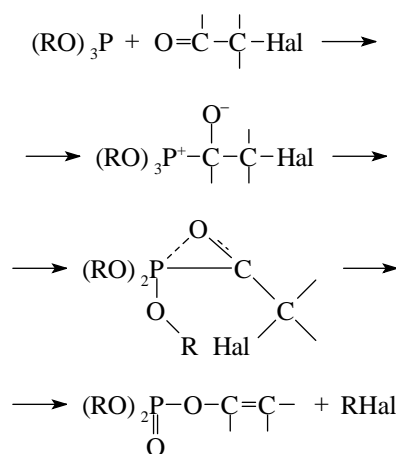
В начале 50-х годов было обнаружено, что взаимодействие эфиров трехвалентного фосфора с  $\alpha$ -галогенкарбонильными соединениями (альдегидами и кетонами) протекает с образованием соединений пентавалентного фосфора, однако новой фосфоруглеродной связи при этом не образуется. В случае реакций с фосфитами образуются соответствующие непердельные фосфаты



Эта реакция получила название реакции Перкова. Она часто протекает параллельно реакции Арбузова как конкурирующая. В научной литературе появилось выражение “аномальное течение реакции Арбузова”.

Когда внимательно рассмотрели примеры реакции Перкова, то пришли к заключению, что никаких аномалий здесь нет. Все дело в том, что реагент имеет два выраженных электрофильных центра: углерод, связанный с галогеном, и углерод карбонильной группы. И соответственно этому реакция может протекать в двух направлениях, ни одно из которых нельзя рассматривать аномальным.

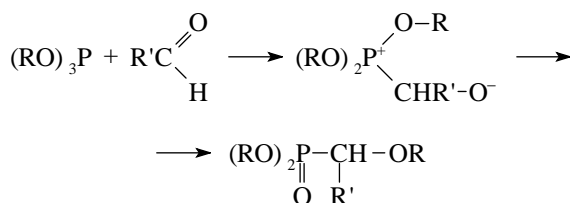
До сих пор нет единого взгляда на механизм реакции Перкова, однако она вписывается в общую схему реакции Арбузова (нуклеофильная атака атома фосфора на электрофильный центр, образование продукта присоединения и его последующий распад), и ее следует рассматривать как частный случай или новый вид этой реакции:



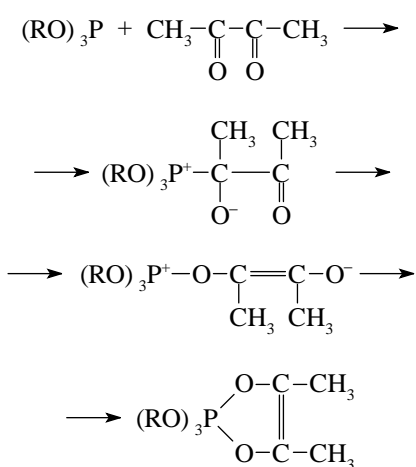
Рассмотренный пример показывает, что органические галогениды, содержащие наряду с атомами галогена другие активные группы, могут реагировать с эфирами трехвалентного фосфора с образованием продуктов, структурно отличающихся от ожидаемых по схеме классической реакции Арбузова. Список же электрофильных реагентов практически не ограничен, причем многие из них вообще не содержат атома галогена. Как трактовать их реакции с эфирами трехвалентного фосфора? Накопленный экспериментальный материал показывает, что практически все реакции производных фосфора с электрофильными реагентами могут быть рассмотрены в рамках реакции Арбузова (как ее новые виды). Ввиду многообразия реагентов, вступающих в реакции с соединениями трехвалентного фосфора, механизмы их протекания неоднозначны.

В серии рассматриваемых реакций (новых видов реакции Арбузова) особенно большое число исследований выполнено по изучению взаимодействия производных кислот трехвалентного фосфора с различными карбонилсодержащими соединениями. Большинство из них, несмотря на свою специфичность, описывается общей двухстадийной схемой с реализацией ее первой или обеих фаз.

Так, взаимодействие полных фосфитов с альдегидами приводит к образованию в качестве конечных продуктов  $\alpha$ -алкоксиалкилфосфонатов (на ход реакции большое влияние оказывает природа альдегида и соотношение реагентов)

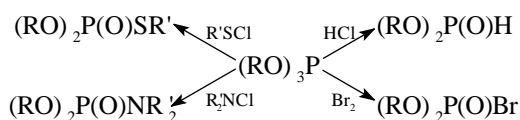


Своеобразно реагируют с фосфитами  $\alpha$ -дикетоны



Реакции фосфитов с  $\alpha$ ,  $\beta$ -непредельными альдегидами и кислотами приводят к образованию соответственно фосфорилированных еноловых эфиров и  $\beta$ -фосфонкарбоновых кислот.

В рассмотренных выше примерах электрофильный центр реагента реализуется на атоме углерода. Описано много примеров, когда с эфирами P(III) вступают в реакции реагенты, содержащие электрофильные атомы водорода, галогена, серы, азота и др. Процесс протекает по схеме реакции Арбузова, но без образования связи C–P



Высокая уязвимость средних фосфитов по отношению к кислотам явилась причиной неудачных попыток их синтеза предшественниками А.Е. Арбузова.

Не имея возможности обилие разноплановых реакций представить в виде обобщенной схемы, мы привели отдельные, наиболее характерные примеры новых видов реакции Арбузова. Даже весьма ограниченное число примеров показывает, насколько широко раздвинулись границы применимости ре-

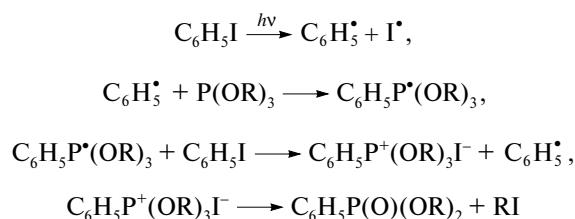
акции Арбузова. Ее синтетические возможности не исчерпаны, она сохраняет большие потенциальные возможности для будущего развития химии фосфорорганических соединений.

## РЕАКЦИЯ АРБУЗОВА В УСЛОВИЯХ ГОМОЛИТИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА

По характеру разрыва химических связей в процессе химических реакций (этим определяется природа активных частиц, принимающих участие в элементарном акте) органические реакции подразделяются на гетеролитические (ионные) и гомолитические (радикальные). Большинство реакций в химии фосфорорганических соединений протекает по гетеролитическому механизму. Именно в результате изучения этих реакций были заложены основы этого раздела химии. Гомолитическая химия соединений фосфора утвердилась значительно позже. Тем не менее ее успехи в настоящее время позволили существенно модифицировать многие синтетические реакции, особенно это относится к синтезу функционально замещенных соединений фосфора. Для того чтобы направить реакцию в русло гомолитического взаимодействия, необходимо вводить в систему вещества, легко генерирующие свободные радикалы (чаще органические пероксиды), или инициировать процесс ультрафиолетовым облучением, радиохимически.

Основная реакция в химии фосфорорганических соединений — реакция Арбузова также может протекать по схеме гомолитических превращений. Последние часто позволяют осуществить реакцию в тех случаях, когда она не идет в обычных условиях (например, с малоактивными галогенопроизводными: арилгалогенидами, винилгалогенидами, перфторалкилиодидами и др.). Ниже даны наиболее характерные примеры гомолитической реакции Арбузова.

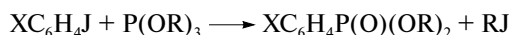
Фотохимическая реакция арилиодидов с триалкилфосфитами приводит к образованию с удовлетворительными выходами соответствующих диалкиларилфосфонатов:



Фенильный радикал, образующийся при фотодиссоциации иодбензола, атакует молекулу триалкилфосфита, результатом чего является рождение фосфорцентрированного (фосфоранильного) радикала. Взаимодействие последнего с иодбензолом приводит к образованию характерного для реакции Арбузова промежуточного продукта квазифосфониевой структуры, деалкилирование которого по

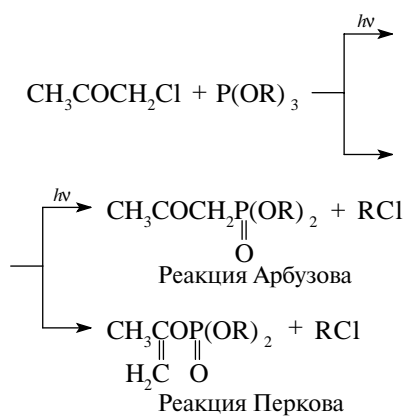
схеме второй стадии является заключительным этапом этой реакции.

Аналогично иодбензолу в гомолитическую реакцию Арбузова успешно вовлечены многие замещенные в ядре арилгалогениды



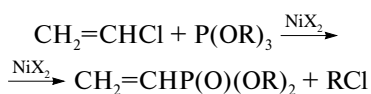
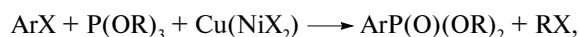
Аналогичной схемой описывается взаимодействие с триалкилфосфитами галогенопроизводных нафталина, фурана, тиофена. Важным достоинством гомолитической реакции Арбузова является также то обстоятельство, что одновременно с образованием связи P—C в молекулы фосфорорганических соединений можно вводить активные функциональные группы. В приведенном выше уравнении реакции заместителями могут служить группы —OH, —NH<sub>2</sub>, —CHO и др.

В некоторых случаях гомолитический механизм может направлять процесс по схеме реакции Арбузова, тогда как в обычных условиях взаимодействие протекает в другом направлении. Так, хлорацетон как α-галогенкарбонильное соединение в обычных условиях реагирует с триалкилфосфитами по схеме реакции Перкова с образованием диалкилизопропенилфосфата. При фотолизе смеси хлорацетона с триалкилфосфитом протекает реакция Арбузова с образованием ацетонилфосфоната



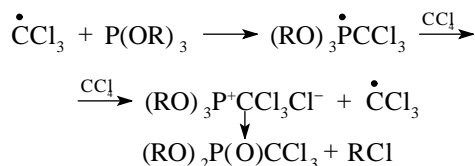
Это еще один удачный пример применения гомолитической реакции Арбузова для синтеза функционально замещенных фосфорорганических соединений.

Часто для стимулирования реакции арил- и винилгалогенидов (хлоридов, бромидов) с триалкилфосфитами применяют катализаторы (бронза, галогениды никеля):



Для данных реакций также предложен гомолитический механизм. Роль катализатора — генерация свободного радикала.

В некоторых случаях течение реакции по гомолитическому механизму может быть обусловлено природой реагента и не требуется специальных условий, благоприятствующих гомолитическим реакциям. Так, для реакции четыреххлористого углерода с триалкилфосфитами также принят гомолитический механизм



Гомолитический механизм может осуществляться также в реакциях полных эфиров кислот трехвалентного фосфора с различными электрофильными реагентами ненасыщенного типа, не содержащими галогенов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, универсальность реакции Арбузова (как ее классического варианта, так и новых видов) состоит в том, что она может быть осуществлена с широким выбором электрофильных реагентов в условиях гетеро- и гомолитического взаимодействия. Не исключается возможность протекания реакции по двум механизмам в одном процессе. Предпочтение тому или иному варианту реакции Арбузова отдадут с учетом конкретных препаративных целей. Эта реакция принесла всемирное признание ее автору, дала ключ к пониманию структуры органических соединений фосфора и тем самым подтвердила плодотворность основных положений теории химического строения А.М. Бутлерова.

Значение новых идей в науке проверяется временем. Прошедшие десятилетия не состарили реакцию Арбузова. Наоборот, в химии фосфорорганических соединений, которая своим становлением и развитием во многом обязана этой реакции, в настоящее время нет другого столь универсального метода синтеза. И хотя химия органических соединений фосфора располагает широким арсеналом синтетических методов (в том числе и приводящих к образованию новых фосфоруглеродных связей), тем не менее реакция Арбузова продолжает оставаться важнейшей.

Реакция Арбузова позволяет вводить фосфорсодержащий заместитель с различным числом фосфоруглеродных связей в другие органические молекулы. Можно сказать и по-другому: с помощью этой реакции мы получаем возможность вводить к атому фосфора самые различные фрагменты органических молекул. Если же в последних имеются

функциональные группы или кратные связи, то такие соединения могут явиться исходными для дальнейших синтезов. Направления дальнейших химических превращений будут определяться природой функциональных групп, фосфорсодержащего заместителя и их взаимным влиянием. Вот в чем уникальность и неисчерпаемые синтетические возможности реакции Арбузова.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Арбузов А.Е.* Избранные труды по химии фосфорорганических соединений. М.: Наука, 1976. 559 с.
2. *Вацуро К.В., Мищенко Г.Л.* Именные реакции в органической химии. М.: Химия, 1976. 528 с.
3. *Пурдела Д., Вылчану Р.* Химия органических соединений фосфора. М.: Химия, 1972. 752 с.
4. *Пудовик А.Н., Газизов Т.Х.* Реакция Арбузова и ее развитие в работах Казанской школы химиков // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1977. Вып. 9. С. 1945-1964.

5. *Лозовой А.С., Москва В.В.* Реакция Арбузова. М.: Знание, 1987. 32 с.

6. *Москва В.В.* Реакция Арбузова // Александр Ерма-нингельдович Арбузов. М.: Наука, 1989. С. 54–72.

7. *Нифантьев Э.Е.* Фосфорорганические соединения // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 7. С. 39–46.

\* \* \*

Виктор Владимирович Москва, доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой органической химии Казанского государственного технологического университета, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заслуженный химик Республики Татарстан. Область научных интересов: органическая химия и химия фосфорорганических соединений. Автор более 400 научных работ.