

Микроволновая активация в химии тетразолов

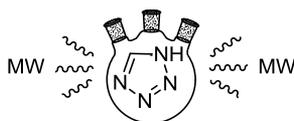
Леонид В. Мызников^{1*}, Светлана В. Ворона¹,
Татьяна В. Артамонова¹, Юрий Э. Зевацкий^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,
ул. Большая Морская, 18, Санкт-Петербург 191186, Россия; e-mail: myznikov_lv@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина),
ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург 197376, Россия; e-mail: yuri@newchem.ru

Поступило 24.05.2016

Принято 9.06.2016



Обобщены и систематизированы данные по применению микроволновой активации в химии тетразолов, опубликованные с 2004 по 2016 г. Основное внимание уделено сравнению результатов, полученных при конвекционном и микроволновом нагревах. Дана оценка перспектив дальнейших исследований в этом направлении.

Ключевые слова: тетразолы, микроволновая активация, превращения, синтез, функционализация.

Интерес к тетразолам в последние десятилетия связан с расширением области практического применения этих соединений. В последние годы тетразолы все чаще упоминаются не только в контексте биомедицинских исследований, но и при разработке различных функциональных материалов.^{1,2} Практическое применение тетразолов, а также их разнообразные химические превращения, позволяющие использовать эти соединения в органическом синтезе, заставляют постоянно искать новые эффективные методы формирования тетразольного цикла и его функционализации. Необходимо отметить, что многие методы синтеза и функционализации тетразолов требуют продолжительного нагревания при высоких температурах и могут сопровождаться образованием побочных продуктов и изомеров. В связи с этим активация химических реакций, их интенсификация и увеличение селективности являются важными актуальными задачами химии тетразолов.

Среди различных неклассических методов активации в химии тетразолов наиболее изучены реакции под действием микроволнового излучения. Первое упоминание о применении микроволнового нагрева в синтезе соединений этого класса относится к 1997 г.³ Хотя с того времени накоплен достаточно большой экспериментальный материал по получению функционально замещенных тетразолов и изучению химических свойств этих соединений в условиях микроволнового

нагрева, результаты этих исследований практически не обсуждались. Так, в недавнем обзоре⁴ систематизированы только реакции образования тетразольного цикла при конвекционном и микроволновом нагревах. В обзоре, посвященном синтезу и функционализации 5-замещенных 1*H*-тетразолов,⁵ в том числе и при микроволновом нагреве, реакции в боковой цепи рассмотрены недостаточно.

Цель настоящего обзора – систематизировать имеющиеся данные по применению микроволновой активации в химии тетразолов и оценить перспективы дальнейших исследований в этом направлении. Основное внимание будет уделено сравнению результатов, полученных при конвекционном и микроволновом нагревах.

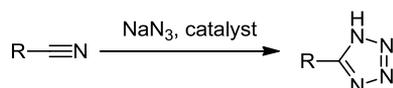
Прежде чем переходить непосредственно к тематике обзора, необходимо сказать несколько слов о терминологии. В англоязычной литературе при описании реакций, проводимых в условиях микроволнового облучения, обычно используются термины MAOS (Microwave-Assisted Organic Synthesis),⁶ MEC (Microwave-Enhanced Chemistry)⁷ и MORE (Microwave-induced Organic Reaction Enhancement).⁸ С учетом того, что далеко не все реакции ускоряются под действием микроволнового излучения,⁹ а также того, что наличие какого-либо специфического (нетермического) микроволнового эффекта ставится под сомнение,¹⁰ они представляются более корректными, чем традиционно

используемый в русскоязычной литературе термин "микроволновая активация". Тем не менее, чтобы не нарушать сложившуюся терминологию, наряду с общепринятыми "микроволновое излучение (облучение)" и "микроволновый нагрев", в данном обзоре мы будем использовать и термин "микроволновая активация".

Реакции образования тетразольного цикла

Наиболее актуальной и востребованной реакцией в химии тетразолов является образование тетразольного цикла при взаимодействии нитрилов с неорганическими азидами в присутствии различных реагентов и катализаторов (схема 1).

Схема 1



Необходимо отметить, что большинство таких синтезов требуют продолжительного нагревания при высоких температурах, особенно в случае дезактивированных алифатических нитрилов. В связи с этим неудивительно, что активации именно таких реакций при помощи микроволнового излучения посвящено большое количество работ.

Анализ литературных данных показывает, что в большинстве случаев применение микроволнового облучения позволяет в несколько раз сократить продолжительность реакции, по сравнению с конвекционным нагревом, и увеличить выходы целевых продуктов.^{11,12,13} Сокращение продолжительности синтеза практически не зависит от типа используемого катализатора, и в большинстве случаев полная конверсия исходного нитрила достигается за 0.5–2 ч. Применение микроволнового излучения эффективно в случае ароматических,^{11,14,15} алифатических¹⁶ и гетероароматических нитрилов,¹⁷ а также в синтезе тетразолопроизводных сахаров¹⁸ и тетразолсодержащих полимеров.¹⁹ Необходимо отметить, что микроволновый нагрев не всегда приводит к ускорению реакции и увеличению выходов продуктов реакции. Так, по нашим данным, в реакции тиоцианатов и нитрилов с NaN_3 и ZnCl_2 в алифатических спиртах²⁰ продолжительности реакций и выходы 5-замещенных 1*H*-тетразолов сопоставимы при использовании как конвекционного, так и микроволнового нагрева.

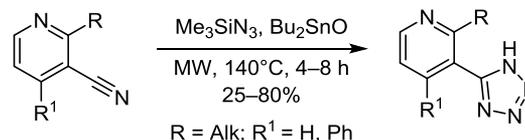
Проведение реакций при температурах 200–220 °C в условиях микроволнового нагрева^{21,22} позволяет сократить продолжительность синтеза до 5–20 мин, однако при этой температуре длительность синтеза становится сопоставима с реакциями, проводимыми с использованием других технологий.^{23,24}

Особый интерес представляет применение гетерогенных катализаторов, пригодных для многократного использования.^{13,25} Так, катализаторы на основе активированного угля, модифицированного наночастицами платины, позволяют синтезировать 5-замещенные 1*H*-тетразолы в условиях микроволнового нагрева при

относительно низкой температуре (90 °C) за короткое время (12–30 мин).²⁶ Несмотря на то, что опубликовано всего несколько работ, посвященных использованию микроволновой активации в таких системах, полученные результаты показывают перспективность исследований в этой области.

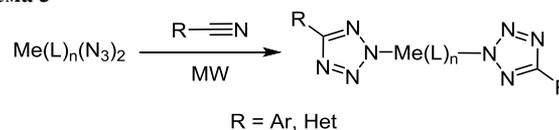
Приведенные выше данные о синтезе тетразолов из нитрилов касаются получения достаточно простых соединений, которые образуются и при конвекционном нагреве. Однако в синтезе стерически затрудненных 3-(1*H*-тетразол-5-ил)пиридинов из соответствующих нитрилов (схема 2) микроволновая активация оказывается единственным возможным приемом, позволяющим получить целевые продукты.^{27,28}

Схема 2



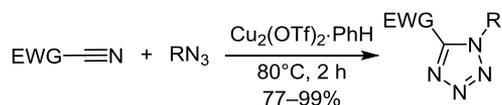
Интересно сравнение результатов, полученных в синтезе комплексных соединений, которые содержат координированный к атому металла тетразольный цикл (схема 3). Так, в случае азидокомплексов платины для образования тетразолов достаточно нагревания в микроволновом реакторе в ДМФА в течение 1 ч при 100 °C,^{29–31} а для аналогичных комплексов Cu^{2+} ,³² Ni^{2+} ³³ и Co^{3+} ^{34,35} – 2–3 ч при 120–130 °C. При конвекционном нагреве для завершения реакции в случае комплексов платины необходимо не менее 12 ч при 100 °C, однако для комплексов других металлов данные о продолжительности синтеза в этих условиях не приводятся.

Схема 3



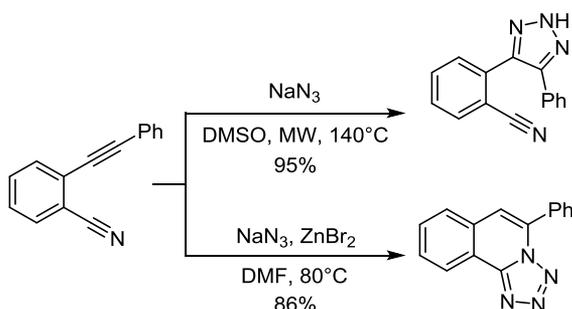
Органические азиды в синтезе тетразолов практически не используются, так как жесткие условия при проведении таких реакций способствуют фрагментации исходных веществ и продуктов реакции. Тем не менее показано, что реакция нитрилов, активированных электроноакцепторными заместителями (EWG), с органическими азидами без растворителя под действием микроволнового излучения приводит к образованию соответствующих тетразолов (схема 4).³⁶ В качестве катализатора в этой реакции используется трифлат меди(I), а основным продуктом реакции является 1,5-дизамещенный тетразол. Интересно, что при взаимодействии дицианамидов с алифатическими азидами в присутствии ZnBr_2 или уксусной кислоты в воде в условиях микроволнового облучения образуются исключительно 2-замещенные 5-гуанидил-2*H*-тетразолы.³⁷

Схема 4



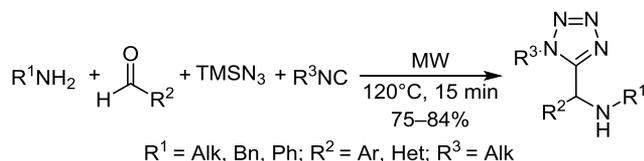
Очень интересные результаты были получены авторами работы³⁸ при изучении реакции NaN_3 с 2-алкинилбензонитрилами (схема 5). В условиях микроволнового нагрева при 140 °С были получены 4,5-дизамещенные 2H-1,2,3-триазолы, в то же время в присутствии избытка NaN_3 и ZnBr_2 в ДМФА при 80 °С и конвекционном нагреве с достаточно высокими выходами образовывались тетразоло[5,1-а]изохинолины.

Схема 5



Микроволновое излучение является одним из наиболее эффективных методов активации многокомпонентных реакций, в том числе и в химии тетразолов. Например, показано, что при использовании микроволновой активации продолжительность реакции Уги (конденсации амина, альдегида, изонитрила и триметилсилилазида) (схема 6) значительно сокращается при существенном росте выхода продукта реакции.³⁹ Во многих случаях такие реакции заканчиваются за несколько минут.^{40,41}

Схема 6



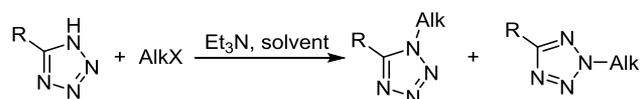
Учитывая растущий в последние годы интерес к многокомпонентным реакциям, в ближайшие годы можно ожидать появления новых публикаций, посвященных этому направлению.

Среди других подходов к синтезу тетразольного цикла можно отметить синтез 5-трифторметил-1-арил-1H-тетразолов из трифторметилимидоилхлоидов⁴² и конденсированных тетразоло[1,5-а]пиридинов из замещенных 2-хлорпиридинов.⁴³ В обоих случаях применение микроволнового нагрева позволило увеличить выходы с 20 до 90% и сократить продолжительность реакции с нескольких часов до 10–15 мин.

Реакции замещения в тетразольном цикле и превращения в боковой цепи

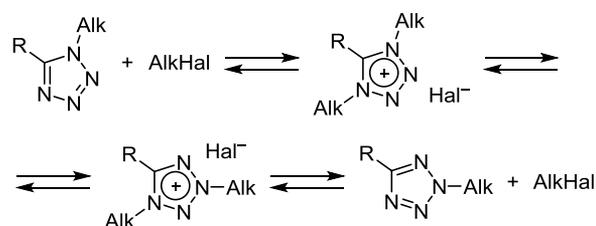
Образование смеси 1- и 2-изомеров в реакциях алкилирования 5-замещенных 1H-тетразолов – одна из известных проблем химии этих соединений. За последние 10 лет опубликовано несколько работ, посвященных изучению данной реакции в условиях микроволнового нагрева. Основная цель этих исследований – изучение влияния микроволнового излучения на селективность и продолжительность синтезов, а также на выходы продуктов реакции. 5-Замещенные тетразолы вводились в реакцию с диметилсульфатом⁴⁴ и замещенными бензилбромидами⁴⁵ в различных растворителях и при разных температурах (схема 7). Во всех случаях, независимо от природы растворителя и типа нагрева, соотношение получаемых продуктов алкилирования по 1-му и 2-му атомам азота практически не менялось. Интересно, что при алкилировании 5-замещенных 1H-тетразолов диметилсульфатом при 40 °С влияние микроволнового излучения на продолжительность синтеза и на выходы продуктов оказалось минимальным. В то же время продолжительность алкилирования бензилбромидом при 75 °С при проведении реакции в условиях микроволновой активации сократилась в три раза при некотором увеличении выходов целевых продуктов.

Схема 7

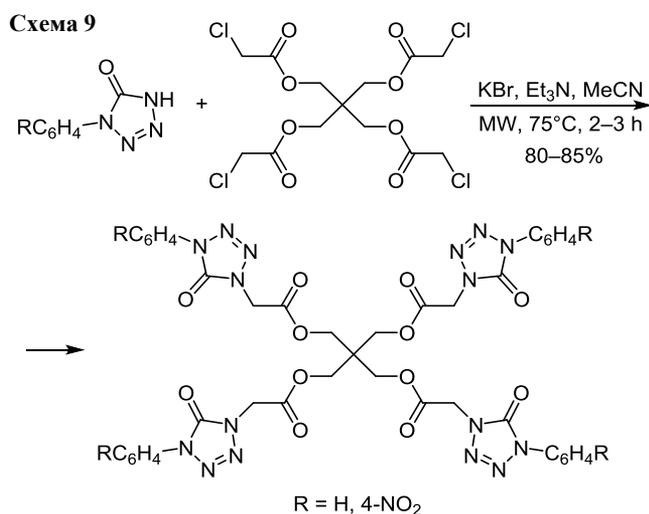


Заметное изменение селективности было обнаружено при проведении алкилирования в избытке диметилсульфата без растворителя. В отсутствие основания при 40 °С эта реакция приводит к смеси 1- и 2-метил-5-R-тетразолов примерно в равном соотношении. При проведении реакции при той же температуре в условиях микроволнового нагрева наблюдалось некоторое увеличение количества 2-метилизомера. Объяснения этого факта авторы статьи⁴⁴ не приводят. Можно предположить, что реакция в последнем случае проходит по известному механизму образования 2-алкилтетразолов из 1-алкилтетразолов в присутствии избытка алкилирующего агента (схема 8).^{46,47} Вероятно, в этом случае увеличение температуры и применение микроволновой активации позволило бы еще больше сместить равновесие в сторону образования 2-изомера, однако таких исследований, к сожалению, сделано не было.

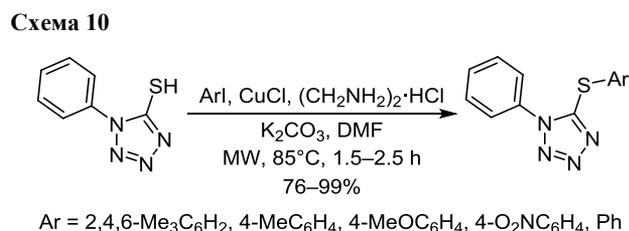
Схема 8



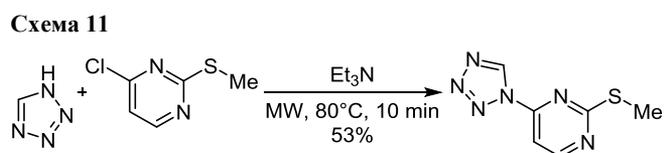
Значительное сокращение продолжительности реакции и увеличение выходов продуктов при использовании микроволнового излучения было достигнуто при проведении алкилирования 5-замещенных 1*H*-тетразолов,⁴⁸ 1-замещенных 1*H*-тетразол-5-онов (схема 9) и 1-замещенных 1*H*-тетразол-5-тиолов⁴⁹ такими пространственно нагруженными субстратами, как тетракис(2-хлор-ацетоксиметил)метан и 1,3-дибром-2,2-бис(бромметил)пропан (в синтезе тетразолсодержащих дендримеров), а также бром- и трифлилпроизводными сахаров.⁵⁰



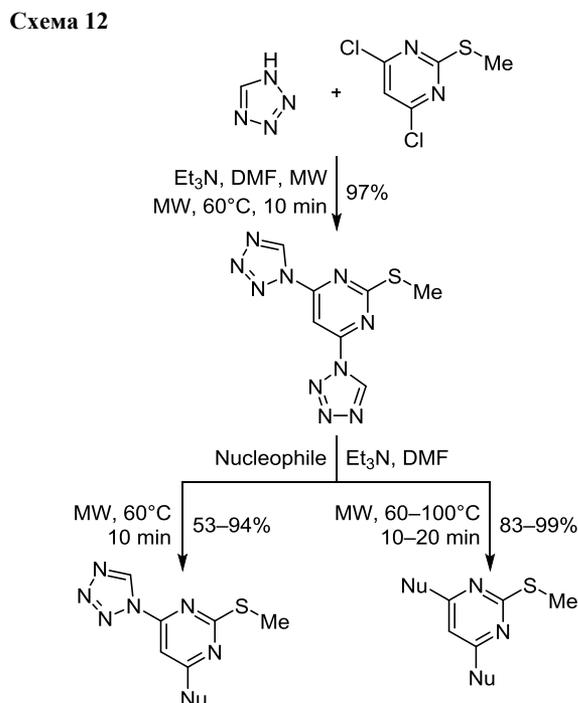
В реакциях катализируемого медью кросс-сочетания 1-арил-1*H*-тетразол-5-тиолов с арилиодидами (схема 10) применение микроволновой активации,⁵¹ по сравнению с неактивированным процессом,⁵² позволяет сократить количество используемого лиганда и заменить основание – карбонат цезия – на более доступный карбонат калия. На основании результатов изучения кинетических закономерностей был сделан вывод об отсутствии специфического микроволнового эффекта в этой реакции.⁵³



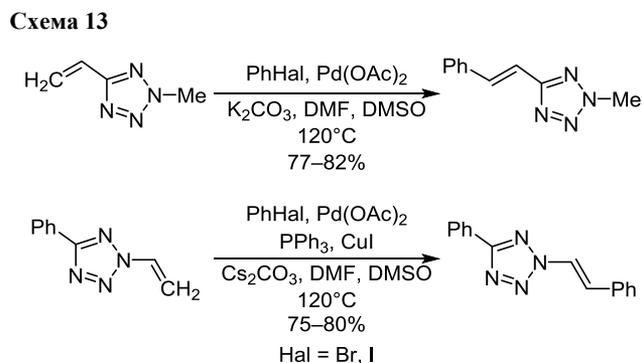
Показано, что моно- (схема 11) и дихлорзамещенные (схема 12) пиримидины легко вступают в реакцию с незамещенным 1*H*-тетразолом без растворителя⁵⁴ или в растворе ДМФА.⁵⁵ Под действием микроволнового излучения реакция заканчивается за 5–10 мин при 60–



80 °С. Авторы работы отмечают, что, по сравнению с конвекционным нагревом, использование микроволнового реактора существенно облегчает синтез – позволяет автоматизировать процесс и точно контролировать температуру в реакционной смеси, что очень важно для применения этого метода в комбинаторной химии. Кроме того, авторы работы⁵⁵ нашли, что фрагменты тетразола в 2-(метилсульфанил)-4,6-бис-(1*H*-тетразол-1-ил)пиримидине в присутствии оснований легко замещаются *O*-, *N*- и *S*-нуклеофилами, в том числе стерически затрудненными (схема 12), что позволяет синтезировать пиримидины с самыми разными заместителями.



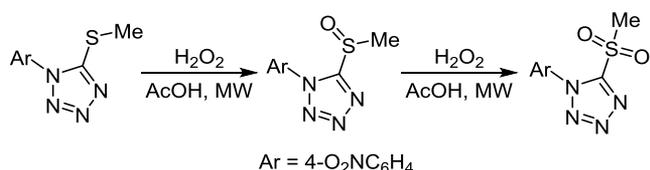
Микроволновый нагрев позволил сократить продолжительность реакции Хека в ряду *C*- и *N*-винилтетразолов с нескольких часов до нескольких минут при сопоставимых выходах замещенных стирилтетразолов (схема 13).⁵⁶ В качестве исходных субстратов в этой реакции могут использоваться иодбензол и бромбензол, однако хлорбензол не вступает в эту реакцию ни при конвекционном, ни при микроволновом нагревах.



Широкое распространение получило окисление замещенных 5-сульфанил-1*H*-тетразолов до соответствующих сульфонилтетразолов, применяющихся как исходные субстраты в реакции Жулии–Кочински. Хотя показано, что при проведении окисления 1-замещенных 5-алкилсульфанил-1*H*-тетразолов пероксидом водорода в уксусной кислоте микроволновый нагрев позволяет сократить продолжительность реакции и увеличить выходы целевых продуктов,⁵⁷ использование именно этого способа нагрева не всегда может считаться рациональным, так как существует множество других реагентов и катализаторов, позволяющих проводить окисление, в том числе и при комнатной температуре.¹

Более интересным представляется применение микроволнового излучения для получения продуктов частичного окисления – замещенных сульфинилтетразолов. Обычно контролируемый кинетически синтез сульфинилтетразолов всегда сопровождается образованием некоторого количества продуктов полного окисления, что приводит к необходимости использования хроматографических методов очистки.⁵⁸ Тем не менее в работе⁵⁹ показано, что 5-метилсульфинил-1-(4-нитрофенил)-1*H*-тетразол может быть получен практически с количественным выходом при окислении соответствующего сульфанильного производного пероксидом водорода в уксусной кислоте при 50 °C в условиях микроволнового нагрева (схема 14). Увеличение концентрации пероксида водорода и температуры до 70 °C приводит к образованию соответствующего сульфонилтетразола.

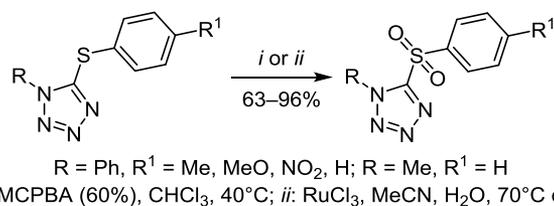
Схема 14



Аналогичное увеличение селективности окисления 5-[(4-метилфенил)сульфанил]-1-фенил-1*H*-тетразола при микроволновом нагреве наблюдали авторы работы,⁶⁰ однако в этом случае избежать образования наряду с 5-[(4-метилфенил)сульфинил]-1-фенил-1*H*-тетразолом соответствующего сульфонильного производного не удалось.

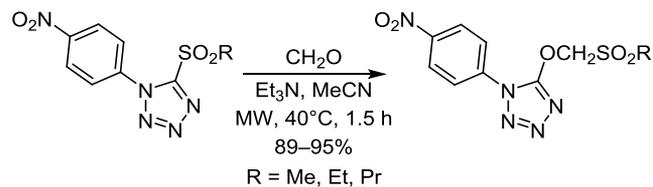
Хорошие выходы 1-замещенных 5-арилсульфонил-1*H*-тетразолов могут быть получены при окислении 1-арилсульфанил-1*H*-тетразолов 60% *m*-хлорпероксибензойной кислотой в хлороформе при 40 °C или периодатом натрия в присутствии хлорида рутения(III) в системе ацетонитрил–вода как при 70 °C, так и при комнатной температуре (схема 15). Интересно, что микроволновое облучение не оказывает существенного влияния в случае первого из двух методов, однако позволяет сократить продолжительность реакции при 70 °C с 2.5 ч до нескольких минут в случае второго.⁶¹

Схема 15



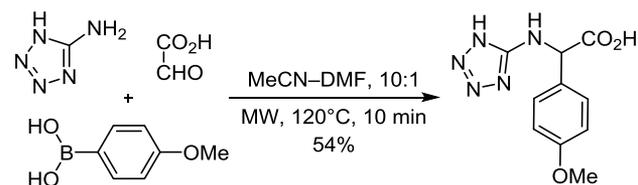
Было обнаружено, что 5-алкилсульфонил-1-(4-нитрофенил)-1*H*-тетразолы легко взаимодействуют с формальдегидом в условиях микроволнового нагрева с образованием соответствующих алкилсульфонилметоксипроизводных (схема 16).⁵⁷

Схема 16



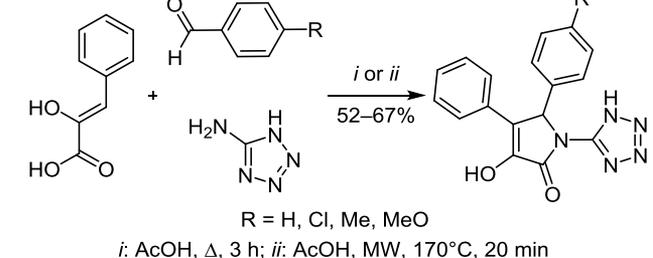
Как уже было сказано выше, микроволновое излучение успешно применяется для активации многокомпонентных реакций. Например, показано, что конденсация 5-амино-1*H*-тетразола с арилбороновой и глиоксиловой кислотами, проходящая при конвекционном нагреве за несколько часов, при микроволновом нагреве заканчивается за несколько минут (схема 17).⁶²

Схема 17



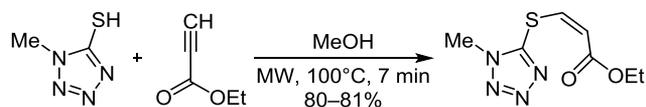
Другой пример многокомпонентной реакции с участием тетразолов – конденсация 5-амино-1*H*-тетразола, фенилпировиноградной кислоты и ароматических альдегидов, с высокой степенью селективности приводящая к замещенным пирролонам (схема 18). При конвекционном нагреве для полного прохождения реакции требовалось кипячение реакционной смеси в течение 3 ч, а при микроволновом нагреве достаточно было выдержать реакцию при 170 °C всего 20 мин.⁶³

Схема 18



Среди других способов функционализации тетразолов представляет интерес реакция присоединения гетероциклических тиолов, в том числе и 1-метил-1*H*-тетразол-5-тиола, к эфирам пропиоловой кислоты, проходящая против правила Марковникова (схема 19). При использовании микроволнового нагрева полной конверсии удается достичь за несколько минут, причем в результате реакции образуются исключительно соответствующие *цис*-изомеры.⁶⁴

Схема 19

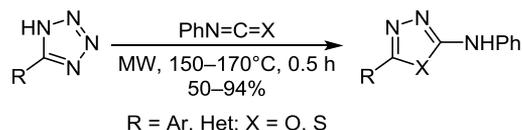


Фрагментация тетразольного цикла

Замещенные тетразолы при нагревании могут разлагаться с образованием реакционноспособных частиц, способных к внутри- или межмолекулярной циклизации, приводящей к получению новых гетероциклических систем. Применение для таких реакций микроволновой активации относительно мало изучено, описано лишь несколько примеров таких превращений.

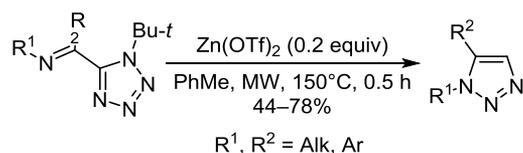
Например, показано, что по сравнению с конвекционным нагревом ряд 5-замещенных 1*H*-тетразолов, успешно вступающих в реакцию с фенилизотиоцианатом⁶⁵ и фенилизотиоцианатом,⁶⁶ при использовании микроволнового нагрева может быть заметно расширен (схема 20).

Схема 20



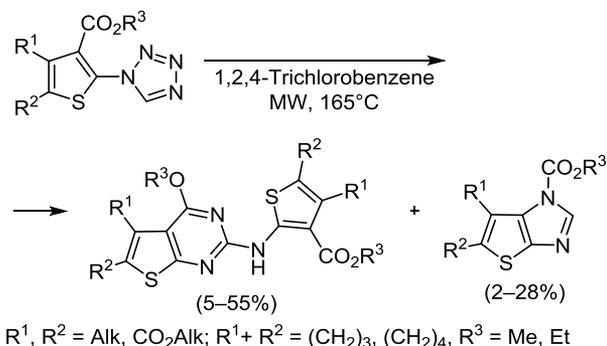
Иминотетразолы легко превращаются в триазолы в условиях микроволновой активации в присутствии кислоты Льюиса (схема 21).⁶⁷

Схема 21



Объектом подробного изучения стал термолит замещенных 1-(тиофен-2-ил)-1*H*-тетразолов в условиях конвекционного и микроволнового нагрева.⁶⁸ В большинстве случаев в ходе термолита наблюдается образование замещенных тиено[2,3-*d*]пиримидинов с примесью небольшого количества тиено[2,3-*d*]имидазолов (схема 22). Применение микроволнового нагрева позволяет значительно сократить продолжительность этих реакций и увеличить выходы продуктов.

Схема 22



Достижения и современные направления исследований в области применения микроволновой активации в органическом синтезе в полной мере находят отражение и в химии тетразолов. Микроволновая активация позволяет интенсифицировать многие превращения в ряду указанных соединений и увеличить выходы продуктов реакций. Эффект от применения микроволнового излучения наиболее заметен для реакций образования и функционализации тетразолов, требующих длительного нагревания, проходящих с участием стерически затрудненных субстратов, а также для большинства реакций, катализируемых переходными металлами. В ряде случаев удается увеличить селективность реакций, что, по всей видимости, связано не со специфическим действием микроволнового излучения, а с термическими эффектами.

Таким образом, несмотря на то, что до сих пор нет единого мнения о наличии или отсутствии специфического (нетермического) микроволнового эффекта, микроволновый нагрев является удобным инструментом, позволяющим интенсифицировать и автоматизировать синтез и превращения замещенных тетразолов, что позволяет предположить дальнейшее развитие этого направления в ближайшие годы.

Список литературы

1. Мызников, Л. В.; Ворона, С. В.; Артамонова, Т. В.; Зевацкий, Ю. Э. *Изв. АН, Сер. хим.* **2016**, 923.
2. Gao, H.; Shreeve, J. M. *Chem. Rev.* **2011**, *111*, 7377.
3. Kidwai, M.; Kumar, P. *J. Chem. Res., Synop.* **1997**, 178.
4. Sakhuja, R.; Panda, S. S.; Bajaj, K. *Curr. Org. Chem.* **2012**, *16*, 789.
5. Roh, J.; Vávrová, K.; Hrabálek, A. *Eur. J. Org. Chem.* **2012**, 6101.
6. Loupy, A. *Microwaves in Organic Synthesis*; Wiley-VCH: Weinheim, 2006, 2nd ed.
7. Bogdal, D.; Prociak, A. *Microwave-Enhanced Polymer Chemistry and Technology*; Blackwell: Ames, 2007.
8. Ahluwalia, V. K.; Aggarwal, R. *Organic Synthesis: Special Techniques*; Alpha Science International Ltd.: Pangbourne, 2001, p. 90.
9. Rosana, M. R.; Tao, Y.; Stiegman, A. E.; Dudley, G. B. *Chem. Sci.* **2012**, *3*, 1240.
10. Kappe, C. O.; Pieber, B.; Dallinger, D. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2013**, *52*, 1088.
11. Roh, J.; Artamonova, T. V.; Vávrová, K.; Koldobskii, G. I.; Hrabálek, A. *Synthesis* **2009**, 2175.

12. Myznikov, L.V.; Roh, J.; Artamonova, T. V.; Hrabalek, A.; Koldobskii, G. I. *Rus. J. Org. Chem.* **2007**, 43, 765. [Журн. орган. химии **2007**, 767.]
13. Myznikov, L.V.; Efimova, Yu. A.; Artamonova, T. V.; Koldobskii, G. I. *Rus. J. Org. Chem.* **2011**, 47, 728. [Журн. орган. химии **2011**, 723.]
14. Shie, J.-J.; Fang, J.-M. *J. Org. Chem.* **2007**, 72, 3141.
15. Schmidt, B.; Meid, D.; Kieser, D. *Tetrahedron* **2007**, 63, 492.
16. Yoneyama, H.; Usami, Y.; Komeda, S.; Harusawa, S. *Synthesis* **2013**, 1051.
17. Spencer, J.; Patel, H.; Amin, J.; Callear, S. K.; Coles, S. J.; Deadman, J. J.; Furman, C.; Mansouri, R.; Chavatte, P.; Millet, R. *Tetrahedron Lett.* **2012**, 53, 1656.
18. Figueiredo, J. A.; Ismael, M. I.; Pinheiro, J. M.; Silva, A. M. S.; Justino, J.; Silva, F. V. M.; Goulart, M.; Mira, D.; Araujo, M. E. M.; Campoy, R.; Rauter, A. P. *Carbohydr. Res.* **2012**, 347, 47.
19. Chen, Y.; He, M.; Wang, C.; Wei, Y. *J. Mater. Chem. A* **2014**, 2, 10444.
20. Vorona, S.; Artamonova, T.; Zevatskii, Y.; Myznikov, L. *Synthesis* **2014**, 781.
21. Cantillo, D.; Gutmann, B.; Kappe, C. O. *J. Am. Chem. Soc.* **2011**, 133, 4465.
22. Cantillo, D.; Gutmann, B.; Kappe, C. O. *J. Org. Chem.* **2012**, 77, 10882.
23. Gutmann, B.; Roduit, J.-P.; Roberge, D.; Kappe, C. O. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2010**, 49, 7101.
24. Palde, P. B.; Jamison, T. F. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2011**, 50, 3525.
25. Marvi, O.; Alizadeh, A.; Zarrabi, S. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2011**, 32, 4001.
26. Erken, E.; Esirden, I.; Kaya, M.; Sen, F. *RSC Adv.* **2015**, 5, 68558.
27. Bliznets, I. V.; Vasil'ev, A. A.; Shorshnev, S. V.; Stepanov, A. E.; Lukyanov, S. M. *Tetrahedron Lett.* **2004**, 45, 2571.
28. Lukyanov, S. M.; Bliznets, I. V.; Shorshnev, S. V.; Aleksandrov, G. G.; Stepanov, A. E.; Vasil'ev, A. A. *Tetrahedron* **2006**, 62, 1849.
29. Lasri, J.; Guedes da Silva, M. F. C.; Kopylovich, M. N.; Mukhopadhyay, B. G.; Pombeiro, A. J. L. *Eur. J. Inorg. Chem.* **2009**, 5541.
30. Mukhopadhyay, S.; Lasri, J.; Charmier, M. A. J.; Guedes da Silva, M. F. C.; Pombeiro, A. J. L. *Dalton Trans.* **2007**, 5297.
31. Smoleński, P.; Mukhopadhyay, S.; Guedes da Silva, M. F. C.; Charmier, M. A. J.; Pombeiro, A. J. L. *Dalton Trans.* **2008**, 6546.
32. Martins, L.; Nasani, R.; Saha, M.; Mobin, S.; Mukhopadhyay, S.; Pombeiro, A. *Molecules* **2015**, 20, 19203.
33. Nasani, R.; Saha, M.; Mobin, S. M.; Mukhopadhyay, S. *Polyhedron* **2013**, 55, 24.
34. Saha, M.; Nasani, R.; Das, M.; Mobin, S. M.; Pathak, B.; Mukhopadhyay, S. *Inorg. Chem. Front.* **2014**, 1, 599.
35. Saha, M.; Nasani, R.; Mobin, S. M.; Pathak, B.; Mukhopadhyay, S. *Inorg. Chem. Commun.* **2013**, 34, 62.
36. Bosch, L.; Vilarrasa, J. *Angew. Chem.* **2007**, 119, 4000.
37. El Remaily, M. A. A.; Mohamed, S. K. *Tetrahedron* **2014**, 70, 270.
38. Tsai, C.-W.; Yang, S.-C.; Liu, Y.-M.; Wu, M.-J. *Tetrahedron* **2009**, 65, 8367.
39. Cárdenas-Galindo, L. E.; Islas-Jácome, A.; Colmenero-Martínez, K. M.; Martínez-Richa, A.; Gámez-Montaño, R. *Molecules* **2015**, 20, 1519.
40. Ahmed, N.; Siddiqui, Z. N. *RSC Adv.* **2015**, 5, 16707.
41. Nayak, M.; Batra, S. *Tetrahedron Lett.* **2010**, 51, 510.
42. Rahmani, F.; Darehkordi, A.; Notash, B. *J. Fluorine Chem.* **2014**, 166, 84.
43. Gogoi, Sh.; Gogoi, S.; Boruah, R. C. *Synthesis* **2013**, 45, 219.
44. Efimova, J. A.; Mashkova, E. A.; Artamonova, T. V.; Koldobskii, G. I. *Chem. Heterocycl. Compd.* **2008**, 44, 498. [Химия гетероцикл. соединений **2008**, 632.]
45. Efimova, Yu. A.; Artamonova, T. V.; Koldobskii, G. I. *Rus. J. Org. Chem.* **2009**, 45, 725. [Журн. орган. химии **2009**, 740.]
46. Isida, T.; Kozima, S.; Nabika, K.; Sisido, K. *J. Org. Chem.* **1971**, 36, 3807.
47. Myznikov, L. V.; Artamonova, T. V.; Koldobskii, G. I.; Hrabalek, A. *Rus. J. Org. Chem.* **2004**, 40, 551. [Журн. орган. химии **2004**, 580.]
48. Zatsepina, M. V.; Hrabalek, A.; Artamonova, T. V.; Koldobskii, G. I. *Rus. J. Org. Chem.* **2006**, 42, 1834. [Журн. орган. химии **2006**, 1844.]
49. Zatsepina, M. V.; Artamonova, T. V.; Koldobskii, G. I. *Rus. J. Org. Chem.* **2006**, 42, 1056. [Журн. орган. химии **2006**, 1073.]
50. Couri, M. R.; Luduvico, I.; Santos, L.; Alves, R.; Prado, M. A.; Freitas Gil, R. *Carbohydr. Res.* **2007**, 342, 1096.
51. Dmitrieva, U. N.; Ramsh, S. M.; Zevatskii, Yu. E.; Artamonova, T. V.; Myznikov, L. V. *Chem. Heterocycl. Compd.* **2012**, 48, 355. [Химия гетероцикл. соединений **2012**, 377.]
52. Aleshunin, P. A.; Aleshunina, D. V.; Ostrovskii, V. A. *Rus. J. Org. Chem.* **2011**, 47, 1786. [Журн. орган. химии **2011**, 1743.]
53. Dmitrieva, U. N.; Artamonova, T. V.; Zevatskii, Yu. E.; Novoselov, N. P.; Myznikov, L. V. *Rus. J. Gen. Chem.* **2013**, 83, 1707. [Журн. общ. химии **2013**, 1486.]
54. Thomann, A.; Börger, C.; Empting, M.; Hartmann, R. W. *Synlett* **2014**, 935.
55. Thomann, A.; Eberhard, J.; Allegretta, G.; Empting, M.; Hartmann, R. W. *Synlett* **2015**, 2606.
56. Aleshunina, D. V.; Aleshunin, P. A.; Artamonova, T. V.; Ostrovskii, V. A. *Rus. J. Org. Chem.* **2014**, 50, 888. [Журн. орган. химии **2014**, 903.]
57. Egorova, N. G.; Artamonova, T. V.; Koldobskii, G. I. *Rus. J. Org. Chem.* **2007**, 43, 475. [Журн. орган. химии **2007**, 474.]
58. Hrabalek, A.; Myznikov, L.; Kunes, J.; Vavrova, K.; Koldobskii, G. *Tetrahedron Lett.* **2004**, 45, 7955.
59. Egorova, N. G.; Artamonova, T. V.; Hrabalek, A.; Koldobskii, G. I. *Rus. J. Org. Chem.* **2005**, 41, 1399. [Журн. орган. химии **2005**, 1427.]
60. Dmitrieva, U. N.; Zevatskii, Yu. E.; Ramsh, S. M.; Artamonova, T. V.; Myznikov, L. V. *Chem. Heterocycl. Compd.* **2012**, 48, 382. [Химия гетероцикл. соединений **2012**, 404.]
61. Myznikov, L. V.; Dmitrieva, U. N.; Artamonova, T. V.; Vorona, S. V.; Novoselov, N. P.; Zevatskii, Yu. E. *Rus. J. Org. Chem.* **2013**, 49, 754. [Журн. орган. химии **2013**, 771.]
62. Follmann, M.; Graul, F.; Schäfer, T.; Kopec, S.; Hamley, P. *Synlett* **2005**, 1009.
63. Sakhno, Y. I.; Desenko, S. M.; Shishkina, S. V.; Shishkin, O. V.; Sysoyev, D. O.; Groth, U.; Kappe, C. O.; Chebanov, V. A. *Tetrahedron* **2008**, 64, 11041.
64. Rajesh, N.; Sarma, R.; Prajapati, D. *RCS Adv.* **2014**, 4, 7834.
65. Efimova, Yu. A.; Karabanovich, G. G.; Artamonova, T. V.; Koldobskii, G. I. *Rus. J. Org. Chem.* **2009**, 45, 1241. [Журн. орган. химии **2009**, 1249.]
66. Efimova, Yu. A.; Karabanovich, G. G.; Artamonova, T. V.; Koldobskii, G. I. *Rus. J. Org. Chem.* **2009**, 45, 631. [Журн. орган. химии **2009**, 644.]
67. El Kaïm, L.; Grimaud, L.; Pravin, P. *Eur. J. Org. Chem.* **2013**, 4752.
68. Soares, M. I. L.; de Lyra, A. C. F.; Henriques, M. S. C.; Paixão, J. A.; Pinho e Melo, T. M. D. V. *Tetrahedron* **2015**, 71, 3343.