

УДК547.551.1+547.381
DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-57-63

Научная статья
Original article

*О. И. Тужигов, С. А. Орлова, Т. В. Хохлова
А. В. Налесная, Б. А. Буравов, О. О. Тужигов*

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ НЕКАТАЛИТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АНИЛИНА С АКРОЛЕИНОМ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

✉ Светлана Аवासхановна Орлова, osa5538@yandex.ru

Аннотация. Исследованы особенности некаталитического взаимодействия анилина с акролеином с целью получения продуктов – олигомеров азометиновых производных. Методами ПМР ^1H , ИК и хромато-масс-спектрологии исследовано строение таких соединений и направление протекания химического процесса их получения.

Ключевые слова: анилин, ненасыщенные альдегиды, межмолекулярная дегидратация, олигомеры, диаллиден-дифениламин

Благодарности: работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «ФХМИ» ВолгГТУ.

Для цитирования: Тужигов О. И., Орлова С. А., Хохлова Т. В., Налесная А. В., Буравов Б. А., Тужигов О. О. Изучение особенностей некаталитического взаимодействия анилина с акролеином. Известия ВолгГТУ. 2025; 12(307): 57–63. DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-57-63.

Информация об авторах:

Олег Иванович Тужигов – д-р хим. наук, профессор кафедры ТВВМ ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0003-1893-2861>

e-mail: tuzhikov_oi@vstu.ru

Светлана Аवासхановна Орлова – канд. техн. наук, доцент кафедры «ОиНХ» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0009-0008-3078-1115>

e-mail: osa5538@yandex.ru

Татьяна Васильевна Хохлова – канд. техн. наук, доцент кафедры ПЭБЖ ВолгГТУ

e-mail: chochlova47@gmail.com

Анна Владимировна Налесная – канд. техн. наук, доцент кафедры «ОиНХ» ВолгГТУ

e-mail: nalesnaya@mail.ru

Борис Андреевич Буравов – канд. техн. наук, доцент кафедры «ОиНХ» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0001-9039-571X>

e-mail: byravov@vstu.ru

Олег Олегович Тужигов – д-р техн. наук профессор кафедры «ОиНХ» ВолгГТУ

<https://orcid.org/0000-0001-6316-8896>

e-mail: tuzhikovoleg@mail.ru

Вклад авторов:

О. И. Тужигов – выдвинул основные идеи, сформулировал постановку цели работы, участвовал в обсуждении результатов.

С. А. Орлова – проведение синтеза исследуемых соединений, написание текста статьи.

Т. В. Хохлова – анализ и интерпретация спектральных данных.

А. В. Налесная – проведение синтеза исследуемых соединений, подготовка образцов к выполнению элементного и других видов анализа.

Б. А. Буравов – контроль синтеза исследуемых соединений методом тонкослойной хроматографии.

О. О. Тужигов – контроль этапов проведения работы, анализ результатов спектральных исследований, участие в обсуждении результатов.

Соединения азометинового ряда и их производные являются эффективными ускорителями вулканизации каучуков общего и специального назначения [1; 2]. К получению пер-

спективных соединений этого класса приводит, в том числе, взаимодействие между анилином и ненасыщенными альдегидами, например, акролеином.

Надо отметить, что сама реакция между анилином и акролеином непосредственно или как промежуточная стадия получения хинолина в каталитическом синтезе по Скраупу в присутствии окислителя и катализатора, где в качестве промежуточного устойчивого продукта образуется соединение типа основания Шиффа [3], изучена в ряде работ [4; 5]. Однако данных о таковом взаимодействии в отсутствии каталитических систем крайне мало и они носят противоречивый характер [6; 7]. Кроме того, в стандартных условиях возможна полимеризация акролеина [8; 9], а его химическая структура делает крайне сложным проведение контролируемого процесса и получение олигомеров заданного строения.

Целью настоящей работы является изучение параметров некаталитического взаимодействия анилина с акролеином в стандартных условиях, анализ механизма реакции и идентификация продуктов – перспективных ускорителей вулканизации каучуков общего и специального назначения.

Экспериментальная часть

Синтез азометиновых производных проводили по общей методике, согласно которой в четырехгорлый реактор, снабженный мешалкой, капельной воронкой, термометром, обратным холодильником, предварительно продутый в течение 10 мин сухим аргоном (продувка аргоном в дальнейшем осуществлялась на протяжении всего процесса) загружали 9,3 г (0,1 моль) анилина. К нему при постоянном перемешивании через капельную воронку подавали пропионовый альдегид или акролеин с такой скоростью, чтобы температура реакционной массы не превышала 24 ± 2 °C, реактор охлаждали смесью соли и воды. По окончании добавления второго компонента реакционную массу выдерживали 2 ч при этой температуре. Затем ее вакуумировали в течение 30 мин при остаточном давлении 5 мм.рт.ст., осадок отфильтровывали, сушили при температуре 30–35 °C в течение 2–4 часов. Конечным продуктом является твердое стеклообразное вещество, хорошо растворимое в ацетоне, толуоле, хлороформе.

Реакцию анилина с пропионовым альдегидом проводили по вышеизложенной методике; анилин предварительно охлаждали до 0 °C и дозировали 5,8 г (0,1 моль) пропанала. Время реакции 1,2 часа. Выход продукта 12,1 г (89,9 %). ИК спектр, ν см⁻¹: 744 (CH₂), 1460, 1476 (CH₃), 1496 (C-C), 1524, 1600 (C-C(аром.)), 2852, 2924

(CH), 3320 (NH). Спектр ЯМР ¹H (300 МГц, CDCl₃), δ м.д.: 0,87; 0,93; 0,99 (CH₂CH₃); 1,40–1,85 (CH₂), 2,97 (OH); 3,61(CH=CH), 4,19; 4,29 (NCH₂); 6,40 – 7,15 (C₆H₅-N). Масс – спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 268, 196, 175, 159, 144, 130, 119, 93, 77, 65, 50. Найдено в %: C 78,41; H 8,84; N 9,68. C₁₈H₂₄ON₂. Вычислено (%): C 76,06; H 8,45; N 9,86.

Реакцию анилина с акролеином проводили по вышеизложенной методике при загрузке 5,6 г (0,1 моль) акролеина. Время реакции 1 час. Выход продукта 12,5 г (95,3 %). ИК спектр, ν см⁻¹: 752 (CH₂), 1032 (C-O), 1212 (OH), 1320 (C-O-C), 1376 (CH₃), 1500, 1600 (C-C(аром.)), 1652 (C=C), 1720 (C=O), 2844–2924 (CH), 3400 (NH₂). Спектр ЯМР ¹H (300 МГц, CDCl₃), δ м.д.: 1,91 (CH₂CH), 3,49(CH=CH), 5.19, 6,23 (CH₂=CH), 6,59 – 7,03 (C₆H₅-N). Масс – спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$, %): 261, 187, 170, 159, 131, 119, 105, 93, 77, 65, 50. Найдено (%): C 82,21; H 6,43; N 10,58. C₁₈H₁₈N₂. Вычислено (%): C 82,44; H 6,87; N 10,68.

Реакцию анилина с акролеином в водной среде проводили по вышеизложенной методике; предварительно загружали 20 мл воды, охлаждали до 5 °C и загружали 5,6 г (0,1 моль) акролеина. Время реакции 1,5 часа. Выход продукта 11,6 г (87,5 %). ИК спектр, ν см⁻¹: 750 (CH₂), 1040 (C-O), 1215 (OH), 1300 (C-O-C), 1376 (CH₃), 1500, 1600 (C-C(аром.)), 1650 (C=C), 2852–2928 (CH), 3400 (NH₂). Найдено в %: C 80,53; H 6,12; N 9,36. C₁₈H₁₈N₂. Вычислено (%): C 82,44; H 6,87; N 10,68.

Реакцию анилина с акролеином в среде толуола проводили по вышеизложенной методике; предварительно загружали 20 мл толуола, охлаждали до 10 °C и загружали 5,6 г (0,1 моль) акролеина. Время реакции 1,25 часа. Наблюдали помутнение раствора и отделение 1 мл воды. Выход продукта 11,85 г (90,4 %). ИК спектр, ν см⁻¹: 750 (CH₂), 1040 (C-O), 1215 (OH), 1320 (C-O-C), 1384 (CH₃), 1500, 1600 (C-C(аром.)), 1652 (C=C), 2849–2914 (CH), 3400 (NH₂). Найдено в %: C 80,94; H 6,48; N 9,52. C₁₈H₁₈N₂. Вычислено (%): C 82,44; H 6,87; N 10,68.

Реакцию анилина с акролеином в среде гексана проводили по вышеизложенной методике; предварительно загружали 20 мл гексана, охлаждали до 5 °C и загружали 5,6 г (0,1 моль) акролеина. Время реакции 0,5 часа. Первоначальный осадок – вязкая масса. Гексан декантировали. Выход продукта 11,3 г (86,2 %). ИК спектр, ν см⁻¹: 747 (CH₂), 1035 (C-O), 1211 (OH),

1300 (C-O-C), 1376 (CH₃), 1500, 1600 (C-C(аром.)), 1650 (C=C), 2852-2926 (CH), 3400 (NH₂). Найдено в %: C 80,32; H 6,38; N 9,37. C₁₈H₁₈N₂. Вычислено (%): C 82,44; H 6,87; N 10,68.

Контроль за протеканием реакции осуществляли методом тонкослойной хроматографии (ТСХ), где в качестве элюента использовали смесь гексан:изопропиловый спирт 10:1,5. Величину R_f продукта определяли как отношение расстояния от центра пятна до старта к расстоянию от фронта подвижной фазы до старта. Гексан (ч. д. а. ТУ2631-003-05807999-98), изопропиловый спирт (х. ч. ТУ6-09-402-87).

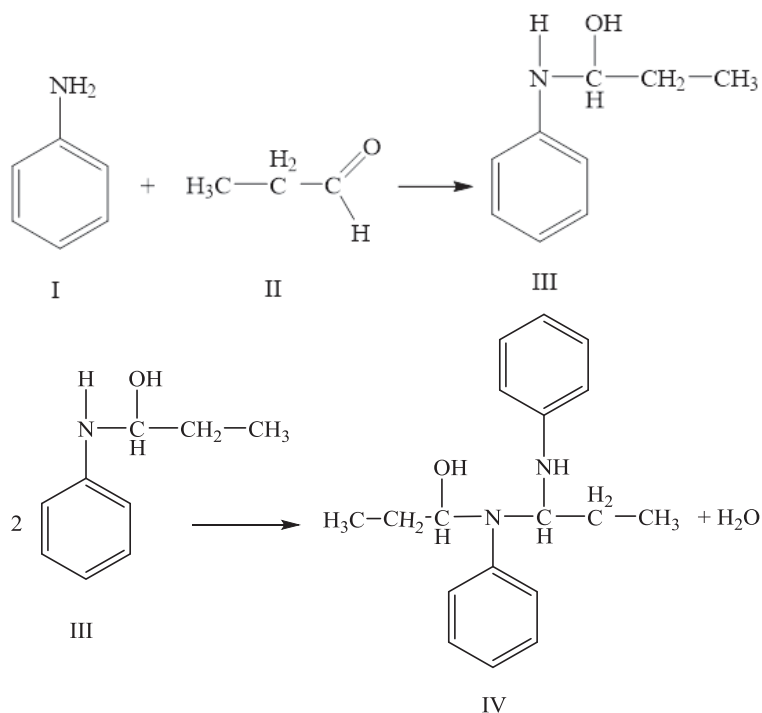
Состав и структура синтезированных продуктов подтверждены данными элементного анализа, ИК-, ЯМР ¹H, хромато-масс-спектрологии.

ИК-спектры записаны на спектрометре «Spekord-M82». Хромато-масс-спектрометрические исследования проводили на приборе Mass Spectrometer Perkin-Elmer (Precisely) Clarus 500. Детектор – MSD. Условия съемки: температура испарителя – 260 °С, начальная температура колонки 100 °С. Через 50 с температуру колонки повышали до 220 °С со скоростью 15 °С/мин. Далее температуру колонки со скоростью 8 °С/мин повышали до 305 °С. Длина колонки 25 м, диаметр 0,2 мм. Стационарная фаза: Elite – 17 MS. Газ носитель – гелий. Спектры ЯМР ¹H записаны на приборе Mercury 300 plus (Varian, США) с рабочей частотой 300 МГц, растворитель – CDCl₃. Элементный анализ проводили по

стандартной методике для твердых проб к универсальному элементному анализатору Valio EL cube (Германия).

Обсуждение результатов

Чтобы оценить роль двойной связи акролеина в реакции с анилином, было изучено взаимодействие анилина (I) с пропионовым альдегидом (II) при температуре 0–5 °С без растворителя. На хроматограмме зафиксированы продукты с R_f = 0,87 и R_f = 0,95. Причем, вещество с R_f = 0,95 является основным и может быть выделено в виде белых кристаллов. В ИК-спектре этого соединения отсутствует полоса поглощения в области 1650 см⁻¹, характерная для валентных колебаний двойных >C=C и >C=N связей и отмечается полоса поглощения в области 3320 см⁻¹, которую можно отнести к >NH и -ОН связям. Таким образом, ИК-спектр соединения не соответствует основанию Шиффа [5]. Этот вывод подтверждает и анализ масс- и ЯМР ¹H-спектров выделенного кристаллического продукта. Так, в масс-спектре присутствуют структурные фрагменты синтезированного соединения с массами, превышающими массу 133, которая соответствует основанию Шиффа, а именно 144, 175, 268. Этот результат позволяет предположить, что стабилизация продукта присоединения пропаналя к амину происходит за счет межмолекулярной дегидратации, ведущей к образованию димера (IV) через промежуточное соединение (III) в соответствии со схемой:

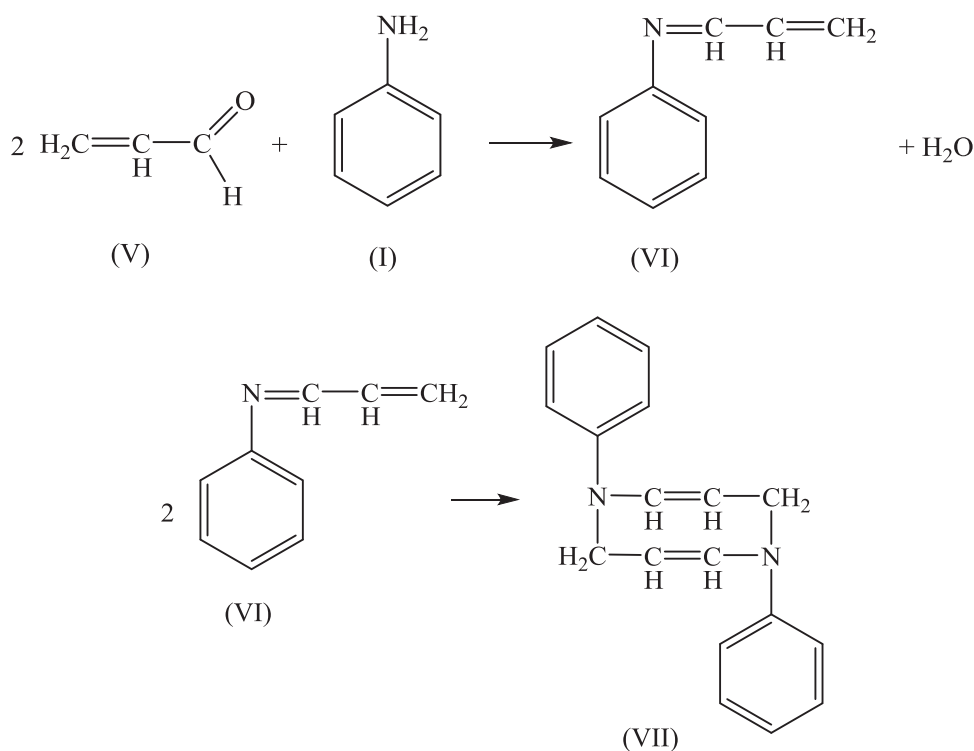


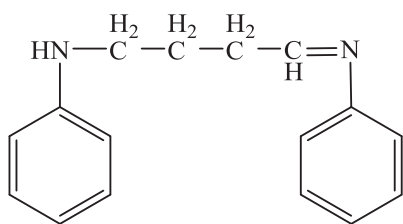
Предлагаемый маршрут реакции хорошо согласуется с результатами ПМР ^1H -спектрального анализа соединения IV, где присутствует триплетный сигнал протонов метальных групп в области 0,87–0,99 м. д. Сложный уширенный мультиплет метиленовых фрагментов при 1,40–1,85 м. д. объясняется различием в окружении этих групп, и вследствие этого, неэквивалентностью их протонов. Метинные протоны проявляются в спектре 3,6 м. д., и по интегральной кривой таких протонов два. Протон вторичного амина дает дуплетный сигнал 4,19 и 4,29 м. д., а протон гидроксильной группы – уширенный сигнал в области 3,0 м. д.

Реакцию анилина с акролеином проводили в аналогичных условиях, в результате были получены соединения с R_f : 0,63; 0,67; 0,72; 0,95, а по интенсивности выделены два продукта с $R_f = 0,67$ и $R_f = 0,72$. Одновременно в ИК-спектре продукта наблюдали уменьшение полос поглощения 1720 и 3400 см^{-1} , характерных для карбонильной и аминогрупп. Поглощение в области 1652 см^{-1} , связанное с наличием двойной связи, в спектре сохраняется. Полученные результаты свидетельствуют о неоднозначности протекания реакции с участием карбонила и двойной связи акролеина с аминогруппой анилина и объясняют противоречивость мнений авторов [6; 10], ранее изучавших этот процесс.

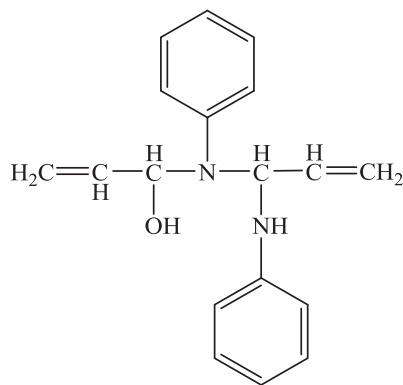
Попытка выделить индивидуальный продукт переосаждением раствора реакционной массы в толуоле гексаном, а также перекристаллизацией из изопропилового спирта не дала положительных результатов ввиду близости физико-химических свойств компонентов реакционной массы.

Сравнение данных ЯМР ^1H и масс-спектров реакционных систем анилин:пропаналь и анилин:акролеин, показывает, что взаимодействие ароматического амина с акролеином (V) более сложно, и подтверждает участие в реакции двойной связи альдегида. Так, в ЯМР ^1H спектре этого продукта хотя и присутствуют два сигнала в области 5,19 и 6,23 м. д., но в соответствии с интегральной кривой их интенсивности, незначительны, то есть маршрут реакции включает взаимодействие по двойной связи акролеина. Вместе с тем, по данным масс-спектра очевидно, что основным продуктом реакции является диаллилиден-дифениламин (VII): в спектре присутствуют интенсивные сигналы молекулярного иона этого соединения с массой 262, а также небольшое количество его олигомеров (VIII) с массой 238 и (IX) с массой 264. При этом их содержание, определенное хроматографическим методом, составляет 7,5 и 10,4 масс. % соответственно. Реакция, вероятно, протекает через промежуточную стадию по схеме:





(VIII)



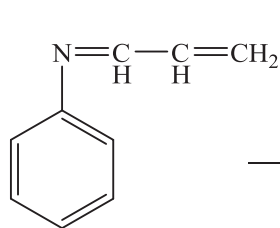
(IX)

и

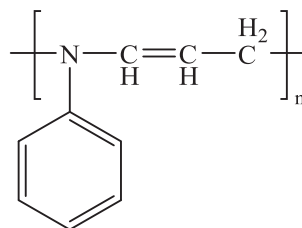
Наличие воды было количественно зафиксировано при проведении реакции в толуоле.

Наряду с диаллилен-дифениламином (VII) в реакции элюировалось вещество с более вы-

сокой молекулярной массой (X с $R_f=0,11$), являющееся, вероятно, результатом олигомеризации диена (VI) и присутствующее в конечном продукте в количестве 4,4 масс. %:



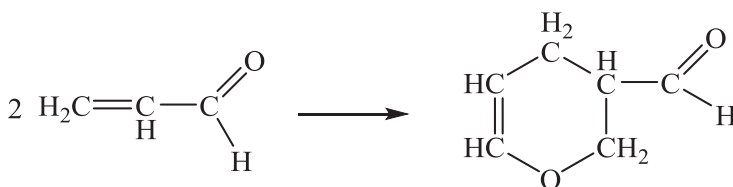
(VI)



(X)

Кроме того, акролеин может выступать как в роли диена, так и диенофила, и для него ха-

рактерно образование 3-формил-2-4-дигидропирана (XI) по реакции Дильса – Альдера:

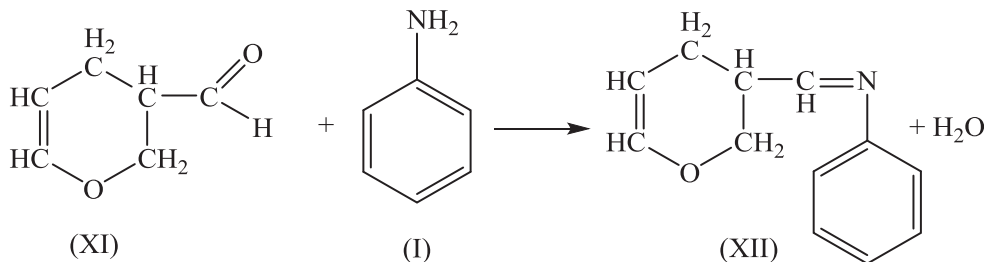


(V)

(XI)

Соединение (XI) легко вступает в реакции с аминами. Поэтому в присутствии анилина

идет образование 4-фенилазаметин-1,2-дигидропирана (XII) в соответствии со схемой:



(XI)

(I)

(XII)

Молекулярный ион соединения (XII), которому соответствует масса 187, присутствует в масс-спектре продукта реакции анилина и ак-

ролеина в количестве 5,6 масс. %, что было определено хроматографическим методом.

Заключение

В работе исследованы процессы некатализитического взаимодействия анилина с акролеином в стандартных условиях, проведен анализ механизма реакции, методами ИК-, ПМР ^1H -и масс-спектрологии, а также данными элементного анализа идентифицированы продукты реакции. Установлено, что основным веществом является диаллиден-дифениламин (VII), его содержание составляет 72,1 масс. %; в значительно меньшем количестве образуются N-фенил-(4-фениламино)бутанимин (VIII) (7,5 масс. %) и 1-(N-(1'-N-фениламино)-2-пропенил)-(n-фенил)амино-пропен-2-ол-1 (IX) (10,4 масс. %). Обнаружены небольшие количества продукта олигомеризации диена (X) (4,4 масс. %) и 4-фенилазаметин-1,2-дигидропиран (XII) (5,6 масс. %). Данные справедливы для смесей анилина и акролеина в отсутствии других реакционноспособных соединений или примесей. Синтезированные соединения могут быть использованы в качестве смесевой композиции, так как характеризуются достаточной совместимостью с вулканизатами каучуков и, являясь азометиновыми производными, представляют интерес в качестве перспективных ускорителей вулканизации и модифицирующих агентов для каучуков общего и специального назначения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Novakov, I. A. Synthesis of Azomethines in the Polymer Matrix / I. A. Novakov, O. M. Novopoltseva, R. A. Rubanova, and others // International Polymer Science and Technology. – 2009. – Vol. 36. № 6. – P. 9–10.
2. Кочетков, В. Г. Синтез и исследование каркасных азометиновых соединений в качестве ингредиентов резиновых смесей / В. Г. Кочетков, В. В. Бурмистров [и др.] // ЖПХ. – 2020. – Т. 93, вып. 6. – С. 802–808.
3. Yalgin, H. First Examples of Doebner–Miller Reaction in Flow: Efficient Production of 2-Methylquinoline Derivatives in Water / H. Yalgin, D. Luat, C. Len // Journal of Flow Chemistry. – 2016. – V. 6(2). – P. 80–85.
4. Григорьева, Н. Г. Цеолиты в синтезе хинолинов реакцией Скраупа / Н. Г. Григорьева, А. В. Байбуртли, Р. З. Куватова [и др.] // Изв.АН, Серия химическая. – 2020. – № 3. – С. 525–528.
5. Пат. 2786740 РФ, МПК С 07 D 215/04. Способ получения хинолинов / А. С. Артемьева, Р. З. Куватова, Н. Г. Григорьева [и др.] – Заявл. 25.01.2022; опубл. 26.12.2022, Бюл. № 35.
6. Ардашев, Б. И. Исследование в области хинолина и его производных: автореф. дис.... д-ра хим. наук / Б. И. Ардашев. – Ростов н/Д, 1956. – 17 с.
7. Горбунов, И. А. Изучение процесса получения анилина как промежуточного продукта в синтезе монометиланилина / И. А. Горбунов, С. Е. Латышова, Е. А. Чаплык // Молодой ученый. – 2018. – № 17 (203). – С. 15–17.
8. Smolkowski, S. Polyacrolein containing microspheres: Synthesis, properties and possible medical applications / S. Smolkowski // Progress in Polymmer Science. – 1998. – Vol. 23, № 5. – P. 815–874.
9. Шульц, Р. Полимеризация акролеина / Р. Шульц. – М.: Мир, 1973. – 421 с.
10. Слезкин, М. С. Разработка альтернативного метода синтеза 4-нитроизатина и получение на его основе конечных пирроло[4,3,2-]хинолин-2-(Ш)-онов // М. С. Слезкин, Т. Г. Кузнецова, С. Н. Мантров // Успехи в химии и химической технологии: Сб. науч. тр. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. – 2009. – Т. XXIII. – № 6. – С. 67–71.

REFERENCES

1. Novakov, I. A. Synthesis of Azomethines in the Polymer Matrix / I. A. Novakov, O. M. Novopoltseva, R. A. Rubanova, and others // International Polymer Science and Technology. – 2009. – Vol. 36. – No. 6. – P. 9–10.
2. Kochetkov, V. G. Synthesis and research of skeleton azomethine compounds as ingredients of rubber compounds / V. G. Kochetkov, V. V. Burmistrov [et al.] // Housing and communal services. – 2020. – Vol. 93, issue.6. – P. 802–808.
3. Yalgin, H. First Examples of Doebner–Miller Reaction in Flow: Efficient Production of 2-Methylquinoline Derivatives in Water / H. Yalgin, D. Luat, C. Len // Journal of Flow Chemistry. – 2016. – V. 6(2). – P. 80–85.
4. Grigorieva, N. G. Zeolites in the synthesis of quinolines by the Skraup reaction / N. G. Grigorieva, A. V. Bayburtli, R. Z. Kuvatova [et al.] // Izv.AN, Chemical series. – 2020. – No. 3. – P. 525–528.
5. Pat. 2786740 of the Russian Federation, IPC C 07 D 215/04. Method of obtaining quinolines / A. S. Artemyeva, R. Z. Kuvatova, N. G. Grigorieva [et al.] – Application. 25.01.2022; publ. 26.12.2022, Bul. No. 35.
6. Ardashev, B. I. Research in the field of quinoline and its derivatives: abstract. dis.... Doctor of Chemical Sciences / B. I. Ardashev. – Rostov n/A, 1956. – 17 p.
7. Gorbunov, I. A. Study of the process of obtaining aniline as an intermediate in the synthesis of monomethylaniline / I. A. Gorbunov, S. E. Latyshova, E. A. Chaplyuk // Young Scientist. – 2018. – № 17 (203). – P. 15–17.
8. Smolkowski, S. Polyacrolein containing microspheres: Synthesis, properties and possible medical applications / S. Smolkowski // Progress in Polymmer Science. – 1998. – Vol. 23, No.5. – P. 815–874.
9. Schultz, R. Polymerization of acrolein/R.Schultz. – M.: Mir, 1973. – 421 p.
10. Slezkin, M. S. Development of an alternative method for the synthesis of 4-nitroisatin and the production of final pyrrolo[4,3,2-]quinoline-2-(Sh)-ones based on it. // M. S. Slezkin, T. G. Kuznetsova, S. N. Mantrov // Successes in chemistry and chemical technology: Collection of scientific papers. Moscow:D.I. Mendeleev Russian Technical Technical University. – 2009. – Vol. XXIII. – No. 6. – P. 67–71.

*O. I. Tuzhikov, S. A. Orlova, T. V. Khokhlova
A. V. Nalesnaya, B. A. Buravov, O. O. Tuzhikov*

**STUDY OF THE FEATURES OF NON-CATALYTIC
INTERACTION OF ANILINE WITH ACROLEIN**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Svetlana A. Orlova, osa5538@yandex.ru

Abstract. The features of non-catalytic interaction of aniline with acrolein have been studied in order to obtain products - oligomers of azomethine derivatives. The structure of such compounds and the direction of the chemical process of their production have been studied using NMR ¹H, IR, and chromatographic-mass spectroscopy.

Keywords: aniline, unsaturated aldehydes, intermolecular dehydration, oligomers, diallylidene-diphenylamine

Acknowledgments: The work was performed using the equipment of the Collective Use Center «Physico-chemical methods of analysis of» Volgograd State Technical University.

For citation: Tuzhikov O. I., Orlova S. A., Khokhlova T. V., Nalesnaya A. V., Buravov B. A., Tuzhikov O. O. Study of the features of the non-catalytic interaction of aniline with acrolein. *Izvestiya VSTU*. 2025; 12(307): 57–63. DOI: 10.35211/1990-5297-2025-12-307-57-63.

Information about the authors:

Oleg I. Tuzhikov – Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Technology of High-Molecular and Fibrous Materials, VSTU

<https://orcid.org/0000-0003-1893-2861>

e-mail: tuzhikov_oi@vstu.ru

Svetlana A. Orlova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry, VSTU

<https://orcid.org/0009-0008-3078-1115>

e-mail: osa5538@yandex.ru

Tatiana V. Khokhlova – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Ecology and Life Safety at VSTU

e-mail: chochlova47@gmail.com

Anna V. Nalesnaya – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry at VSTU

e-mail: nalesnaya@mail.ru

Boris A. Buravov – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry, VSTU

<https://orcid.org/0000-0001-9039-571X>

e-mail: buravov@vstu.ru

Oleg O. Tuzhikov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of General and Inorganic Chemistry, VSTU

<https://orcid.org/0000-0001-6316-8896>

e-mail: tuzhikovoleg@mail.ru

Contribution of the authors:

Oleg I. Tuzhikov – put forward the main ideas, formulated the purpose of the work, participated in the discussion of the results.

Svetlana A. Orlova – synthesizing the studied compounds, writing the text of the article.

Tatiana V. Khokhlova – analyzing and interpreting spectral data.

Anna V. Nalesnaya – synthesizing the studied compounds, preparing samples for elemental and other types of analysis.

Boris A. Buravov – controlled the synthesis of the studied compounds by thin-layer chromatography.

Oleg O. Tuzhikov – control of the stages of the work, analysis of the results of spectral studies, participation in the discussion of the results.

Статья поступила в редакцию 06.10.2025, доработана 17.11.2025, подписана в печать 03.12.2025

The article was submitted 06.10.2025, revised 17.11.2025, accepted for publication 03.12.2025