ISSN 1506-2017

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

УСПЕХИ В ХИМИИ И ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Том XL

№ 9

Москва
2026

УДК 66.01-52
ББК 24. 35
У78

Рецензент:
Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева

Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XL,
У78 № 9 (313). – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2026. – 211 с.

В сборник вошли статьи по актуальным вопросам в области теоретической и экспериментальной химии.

Материалы сборника представлены для широкого обсуждения на XXI Международном конгрессе молодых ученых по химии и химической технологии «UCChT-2026», XL Международной конференции молодых ученых по химии и химической технологии «МКХТ-2026», ряде международных и российских конференций, симпозиумов и конкурсов, а также на интернет-сайтах.

Сборник представляет интерес для научно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов химико-технологических вузов.

УДК 66.01-52
ББК 24. 35

ISSN 1506-2017

© Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 2026

Власкин И.А., Комарова М.А., Мельников Н.О., Шалабин М.В.
Особенности применения методов синхронного термического анализа для оценки свойств огнезащитных покрытий после искусственного старения 101

Гуреева В.Г., Щетинина С.А., Михеев Д.И., Султанов Е.В.
Влияние влажности атмосферного воздуха на сорбцию диоксида азота..... 104

Дерябина Д.А., Райкова В.М.
Сравнительный анализ методов расчета нижнего концентрационного предела распространения пламени кислородсодержащих органических веществ 108

Звездунова В.А., Шушпанов А.Н., Солодухин Е.С.
Влияние соотношения компонентов на параметры горения и взрыва модельного гранулита 112

Чаплыгин А.Е., Козлова Е.В., Васин А.Я.
Пожаровзрывоопасные свойства 2,3,4-тригидроксибензофенон нафтохинон-1,2-диазидо-5-сульфоната 116

Листопад О.И., Акинин Н.И.
Анализ риска аварий на установке производства формалина с применением метода дерева событий 120

Марфина А.Д., Аносова Е.Б.
Уточнение значений критериев горючести строительных материалов на основе древесно-стружечных плит 123

Савлов Н.А., Комарова М.А., Мельников Н.О., Шалабин М.В.
Изучение влияния атмосферных факторов на свойства огнезащитных вспучивающихся покрытий..... 126

Самойлова Т.С., Сорокин И.О., Райкова В.М., Шушпанов А.Н.
Исследование температуры вспышки бинарных растворов на основе орто-ксилола 129

Сергунова А.Э., Мельников Н.О., Гаджиев Г.Г., Султанов Е.В.
Переработка эмульсионных матриц промышленных взрывчатых веществ со специальными технологическими добавками 133

Сипилина А.А., Советин Ф.С., Шаталов К.И., Шушпанов А.Н.
Термический анализ и определение кинетических параметров пигмента азокрасителя Красный 2С..... 136

Чаплыгин А.Е., Науменко А.В., Васин А.Я.
Термический анализ и пожаровзрывоопасность долутегравир натрия..... 139

Шугаева А.Р., Мельников Н.О., Акинин Н.И.
Идентификация антипиренов в древесине методами сканирующей электронной микроскопии и термического анализа 143

Борисова А.С., Чёрный А.Н.
Влияние активного связующего на закономерности горения топливных композиций . 147

УДК 543.57 504.5:667.281 544.45

Сипилина А.А., Советин Ф.С., Шаталов К.И., Шушпанов А.Н.

Термический анализ и определение кинетических параметров пигмента азокрасителя Красный 2С

Сипилина Алина Александровна – студентка группы МИ-12; sipilina.alya03@mail.ru
Советин Филипп Сергеевич – к.т.н., доцент кафедры информатики и компьютерного проектирования;
Шаталов Кирилл Ильич – к.х.н., доцент кафедры общей и неорганической химии;
Шушпанов Александр Николаевич – к.т.н., доцент кафедры Техносферной безопасности;
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В статье рассматриваются результаты исследования термического разложения пигмента Красный 2С. Приведены данные инфракрасной спектроскопии, подтверждающие строение исследуемого азосоединения. Установлено, что исследуемый образец термически довольно стабилен, первичный акт разложения, связанный с деструкцией азогруппы, начинается при 280 °С. Методом Киссинджера определены кинетические параметры процесса термического разложения: E_A=116 кДж/моль, $A(c^{-1})=9{,}34\cdot10^7$, logA=7,97, $k(T)=6{,}7\cdot10^3\cdot e^{-13961/T}$. Выдвинуто предположение о пожаровзрывобезопасности аэровзвеси пигмента.

Ключевые слова: азокрасители, ИК-спектроскопия, термический анализ, кинетические параметры, метод Киссинджера.

Thermal analysis and determination of the kinetic parameters of the azo dye pigment Red 2C

Sipilina A.A., Sovetin F.S., Shatalov K.I., Shushpanov A.N.
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article examines the results of a study on the thermal decomposition of Red 2C pigment. Infrared spectroscopy data are presented, confirming the structure of the azo compound under study. It was found that the sample is relatively thermally stable, with the primary decomposition event, associated with the destruction of the azo group, beginning at 280°C. The kinetic parameters of this process were determined using the Kissinger method: E_A=116 кДж/моль, $A(c^{-1})=9{,}34\cdot10^7$, logA=7,97, $k(T)=6{,}7\cdot10^3\cdot e^{-13961/T}$. An assumption has been made about the fire and explosion safety of the pigment air suspension: it is probably safe.

Key words: azo dyes, IR spectroscopy, thermal analysis, kinetic parameters, Kissinger method.

Введение

Синтетические органические красители азогруппы занимают лидирующее положение среди промышленных пигментов благодаря технологичности синтеза и богатству цветовой палитры. Однако их широкое использование сопряжено с необходимостью оценки рисков, связанных с термическим воздействием. Нагрев таких соединений в процессах сушки, переработки или при аварийных ситуациях может инициировать экзотермические превращения, приводящие к внутреннему неконтролируемому перегреву и разложению и, в ряде случаев, к возгоранию или взрыву [1,2]. Поэтому определение и изучение закономерностей термического разложения азокрасителей является необходимым условием для обеспечения безопасных режимов эксплуатации и хранения.

Исследования последних лет показывают, что термическая стабильность азосоединений определяется совокупностью структурных факторов: природой заместителей, наличием внутримолекулярных водородных связей и степенью сопряжения ароматических систем [3]. При этом именно азогруппа выступает в качестве наиболее лабильного фрагмента, инициирующего деструкцию при нагреве. В литературе неоднократно отмечалось, что разложение азокрасителей может протекать с самоускорением по автокаталитическому механизму, что существенно повышает опасность неконтролируемого тепловыделения [4].

Основное преимущество термического анализа (ТГ-ДТА) заключается в возможности одновременной регистрации потери массы, скорости процесса и связанных с ним тепловых эффектов в непрерывном режиме нагрева. Для азокрасителей этот метод особенно информативен, поскольку позволяет точно определить температурный интервал деструкции азогруппы – ключевого элемента, являющегося сильным хромогеном и ответственного как за окраску, так и за термическую нестабильность [5].

Экспериментальная часть

В работе рассматривается пигмент красный 2С, полученный на кафедре технологии тонкого органического синтеза и химии красителей РХТУ им. Д.И. Менделеева. Данный краситель представляет собой азосоединение, в структуре которого содержится азогруппа –N=N–, связывающая два нафталиновых кольца, а также две сульфогруппы и гидроксильная группа, благодаря которым пигмент имеет хорошую растворимость в воде и интенсивную окраску. Запись структуры в нотации SMILES выглядит, как O=S(=O)(O[Na])c4ccc(/N=N\c1ccc(c2ccccc12)S(=O)(=O)O[Na])c3ccccc34. Молярная масса пигмента составляет 502 г/моль.

С целью подтверждения строения исследуемого вещества применялся метод ИК-спектроскопии. ИК-спектр (рис. 1) записывали на Фурье-спектрометре в смеси с таблетками бромида калия. Расшифровку полученных спектров проводили по справочным данным [6]. В результате были

установлены функциональные группы, представленные в таблице 1.

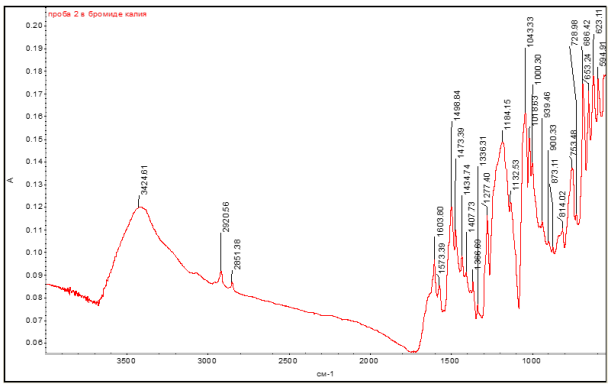

Рис. 1. ИК-спектры пигмента Красный 2С

Таблица 1. Результаты расшифровки ИК-спектров пигмента азокрасителя Красный 2С

Функциональная часть молекулы	Справочные данные, $см^{-1}$	Фактические данные, $см^{-1}$
Бензольное кольцо	1525–1475 (d)	1473,4
	1600–1575 (d)	1573,4
Гидрокси-группа (–OH)	750–650 (v)	653
Азо-группа (–N=N–)	1600–1400 (v)	1434,7
Сульфонатная группа (триплет)	1210–1150 (v)	1184
Нафталиновое кольцо	1410 (v)	1407,7

По результатам расшифровки данных, полученных из ИК-спектрограммы, наличие характерных полос поглощения азогруппы, сульфонатной группы, бензольного и нафталинового колец является подтверждением строения исследуемого красителя и служат основанием к проведению расчетов пожароопасных характеристик.

Затем, для изучения термической стабильности, выявления температурных интервалов деструкции, а также оценки склонности вещества к экзотермическим превращениям был применен метод дифференциального термического анализа и термогравиметрии (ТГ-ДТА). Эксперименты проводились на дериватографе типа С. Для опытов брали пигмента Красный 2С массой 25 мг и нагревали в интервале температур от 25 до 700 °С с разными скоростями: 2,5; 5; 7,5 и 10 °С/мин в окислительной атмосфере (воздух). Полученные кривые ТГ, ДТГ и ДТА при всех скоростях нагрева имеют качественно схожий характер, поэтому в работе приводится одна из полученных дериватограмм, которая регистрировалась при скорости 10 °С/мин (рис. 2).

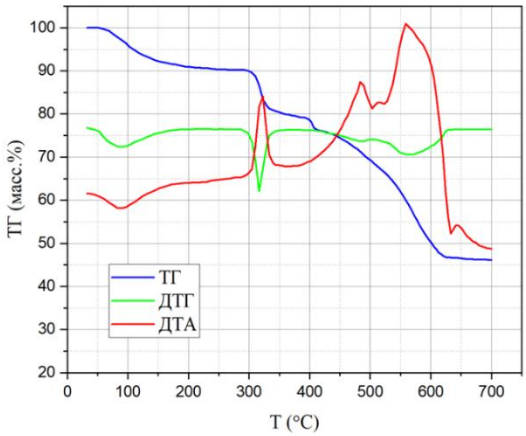

Рис 2. Дериватограмма навески пигмента К*расный 2С массой 25 мг при скорости нагрева 10 °С/мин*

В таблице 2 приведены основные количественные отличия, связанные с некоторыми температурными показателями 2 этапа разложения и величинами потери массы.

Таблица 2. Температурные характеристики красителя Красный 2С, полученные из кривых TG-DTA-DTG

Скорость нагрева, °С/мин	Атмосфера воздуха			
	$t_{нэр.}$, °С	$t_{max\ экз.}$, °С	$\Delta m_{экз.\ эфф.}$, %	Δm_{Σ}, %
2,5	270	293	9	60
5	280	307,9	10	54
7,5	300	319	9	60
10	300	322,7	10	54

Как видно из таблицы 2, с увеличением скорости нагрева наблюдается закономерное повышение температуры начала разложения ($t_{нэр}$) с 270 до 300 °С и температуры максимума первого экзотермического эффекта ($t_{max\ экз}$) с 293 до 323 °С. Такой стиль поведения характерен для процессов термического разложения твердых органических веществ и связано с тепловой инерцией образца.

Анализ дериватограмм позволяет выделить три основных этапа термического разложения пигмента.

Первый этап наблюдается в интервале от 50 до 200–250 °С (при увеличении скорости нагрева верхняя граница интервала повышается) и

сопровождается плавной потерей массы около 10%. При этом на кривой ДТА наблюдается небольшой эндотермический эффект, что указывает на процесс дегидратации, т.е. удаление адсорбированной влаги.

Второй этап разложения соответствует интервалу 270–350 °С (температурные границы также сдвигаются в сторону более высоких значений с ростом скорости нагрева). На кривой ДТА в данном температурном диапазоне наблюдается резкий экзотермический пик с максимумом при 293–328 °С. Данный этап связан с деструкцией наиболее лабильного звена молекулы – азогруппы (–N=N–), что подтверждается литературными данными [2]. Потеря массы при этом составила 9–10 %.

Третий этап охватывает интервал от 370–400 до 620 °С. На кривой ДТА наблюдается длительный, значительно более интенсивный экзотермический эффект, имеющий от 2 до 3 ярко выраженных экзотермических пиков, что свидетельствует о многостадийном окислении углеродного остатка и завершении термодеструкции. Суммарная потеря массы за весь период эксперимента варьируется в пределах 54–60 %, что указывает на достаточно полное выгорание органической части пигмента.

Было также отмечено, что в поведении кривых ТГ-ДТА изучаемого пигмента наблюдается визуальное сходство с описанными ранее исследованиями красителя азорубина [1], из чего следует предположение о возможной схожести химического состава и структуры рассматриваемых веществ. Та же схожесть фиксируется при сопоставлении ИК-спектров данных красителей, что тоже указывает на схожее химическое строение.

Кинетические параметры были определены методом Киссенджера [7] по максимумам температурных эффектов первого экзотермического пика (см. табл. 2). Рассчитанная энергия активации составила E_A= 116 кДж/моль, предэкспоненциальный множитель $A(c^{-1})=9{,}34\cdot10^7$, $\log A=7{,}97$. Уравнение прямой, выраженной через температурную зависимость константы скорости реакции k(T), имеет вид $k=6{,}7\cdot10^3\cdot e^{-13961/T}$. Полученное значение энергии активации характерно для процессов, контролируемых разрывом ковалентных связей в органических молекулах.

Заключение

Из-за недостаточного количества вещества не было возможности провести испытание пыли на пожаровзрывоопасность по ГОСТ 12.1.044-2018, но на основании того, что общая доля сульфогрупп составляет 41% от молярной массы молекулы, теоретически можно предположить, что аэровзвесь с высокой долей вероятности окажется пожаровзрывобезопасной [8]. Полученные в работе кинетические параметры могут быть использованы для прогнозирования поведения пигмента в условиях длительного нагрева и при оценке термических рисков в технологических процессах. Сопоставление с литературными данными для близких по строению азосоединений подтверждает определяющую роль сульфогрупп в снижении горючести материала. Сочетание ИК-спектроскопии и термического анализа позволило не только подтвердить строение пигмента Красный 2С, но и предложить качественную схему его термической деструкции.

Список литературы

1. Терехова М.А. Термический анализ и определение кинетических параметров термолиза ряда азокрасителей: выпускная квалификационная работа. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2024. – 120 с.

2. Васин А.Я. Диссертация доктора технических наук. – М.: РХТУ, 2008 – 320 с.

3. Thermal hazards assessment of three azo nitrile compounds / C. Yang, D. Aljović, T.P. Vickery// Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – Vol. 172. – P. 1026–1044.

4. Kocaokutgen H., Gümrükçüoğlu I.E. Thermal characterization of some azo dyes containing intermolecular hydrogen bonds and non-bonds // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2003. – Vol. 71. – P. 675–679.

5. Михеев В.В., Миронов М.М., Абдуллина В.Х. Химия красителей и крашения: учебное пособие. – Казань: Казанский государственный технологический университет, 2009. – 89 с.

6. Тарасевич Б.Н. ИК спектры основных классов органических соединений: справочные материалы / Б.Н. Тарасевич. – М.: Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. – 55 с.

7. Kissinger, H. E. Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis / H. E. Kissinger // Analytical Chemistry. – 1957. – Т. 29. – № 11. – С. 1702-1706.