

DOI: 10.24000/0409-2961-2024-9-43-48

УДК 544.454.2

© А.Н. Шушпанов, А.Я. Васин, В.М. Райкова, 2024

## Расчет параметров теплового взрыва нафтохинондиазидных фоторезистов на основе экспериментальных данных



**А.Н. Шушпанов,**  
канд. техн. наук,  
доцент,  
shoo@count0.ru



**А.Я. Васин,**  
д-р техн. наук,  
проф.



**В.М. Райкова,**  
канд. техн. наук,  
доцент

РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

Для двух представителей ряда нафтохинондиазидов, полупродуктов производства позитивных фото-

резистов — моносодиевой соли 1,2-нафтохинондиазид(2)-5-сульфоукислоты (Краситель М) и 1,2-нафтохинондиазид(2)-5-сульфохлорида (Краситель N2), доказана применимость классической теории теплового взрыва. С использованием экспериментальных кинетических параметров и теплот разложения красителей проведен расчет параметров теплового взрыва в адиабатических условиях и условиях конвективного теплообмена. Расчетная температура самовоспламенения (вспышки) вещества, рассчитанная с учетом теплоотвода и геометрии производственного оборудования, составила 135 °С для Красителя М и 93 °С для Красителя N2, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. Приведены рекомендации для выбора безопасных температурных режимов сушки исследованных соединений.

**Ключевые слова:** кинетические параметры, Краситель М, Краситель N2, критерий взрывчатости, нафтохинондиазиды, период индукции, температура вспышки, температура самовоспламенения, термический анализ, фоторезисты.

**Для цитирования:** Шушпанов А.Н., Васин А.Я., Райкова В.М. Расчет параметров теплового взрыва нафтохинондиазидных фоторезистов на основе экспериментальных данных // Безопасность труда в промышленности. 2024. № 9. С. 43–48. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-9-43-48

### Calculation of Thermal Explosion Parameters for Naphthoquinondiazide Photoresists Based on Experimental Data

A.N. Shushpanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., shoo@count0.ru, Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation

A.Ya. Vasin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation

V.M. Raykova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The study is focused on the applied task of determination of self-ignition (flash) temperature of unstable substances in order to facilitate occupational safety without conducting large-scale experiments. For two representatives of a number of naphthoquinondiazides, semi-products of production of positive photoresists—monosodium salt 1,2-naphthoquinondiazide(2)-5-sulfonic acid (Dye M) and 1,2-naphthoquinondiazide(2)-5-sulfochloride (Dye N2), the applicability of the thermal explosion classic theory has been proved. Using experimental kinetic parameters and the heat of decomposition of dyes, parameters of a thermal explosion in adiabatic conditions and convective heat transfer conditions have been calculated. As the analysis of obtained dependences shows, the linear dependence of slow growth (induction period) with time transforms into exponential dependence for each substance. Notably, the heat resistance of Dyes M and N2 is rather low. It has been shown that the slow decomposition of substances in conditions of the missing heat sink can transform into the stage of thermal explosion. The design temperature of self-ignition (flash) of the substance calculated considering the heat sink and the geometry of process equipment is 135 °C for Dye M and 93 °C for Dye N2, which complies with the experimental data. The recommendations on the selection of safe temperatures for drying modes of the studied compounds have been provided.

**Keywords:** kinetic parameters, Dye M, Dye N2, explosive criterion, naphthoquinondiazides, induction period, flash temperature, self-ignition temperature, thermal analysis, photoresists.

**For citation:** Shushpanov A.N., Vasin A.Ya., Raykova V.M. Calculation of Thermal Explosion Parameters for Naphthoquinondiazide Photoresists Based on Experimental Data. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2024. № 9. pp. 43–48. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2024-9-43-48

### Введение

Фоторезисты — светочувствительные материалы, изменяющие свои физико-химические свойства под воздействием света видимого или ультрафиолетового спектра.

В настоящее время широкое распространение имеют позитивные фоторезисты, синтезированные

на основе нафтохинондиазидов (НХД, в литературе также встречается название «диазоафтолы»). Несмотря на то что НХД начали тщательно изучать еще в середине XX в., до недавнего времени не весь их промышленный и фундаментально научный потенциал был раскрыт полностью. С развитием науки возникают новые потенциальные отрасли приме-

нения НХД. Конечные формы выпуска фоторезистов предстают в качестве одного из приоритетных объектов Программы фундаментальных научных исследований [1]. Конкретно в документе речь идет об изучении свойств веществ двойного назначения, в частности таких, которые способны формировать слои с определенными свойствами под воздействием света и иных излучений.

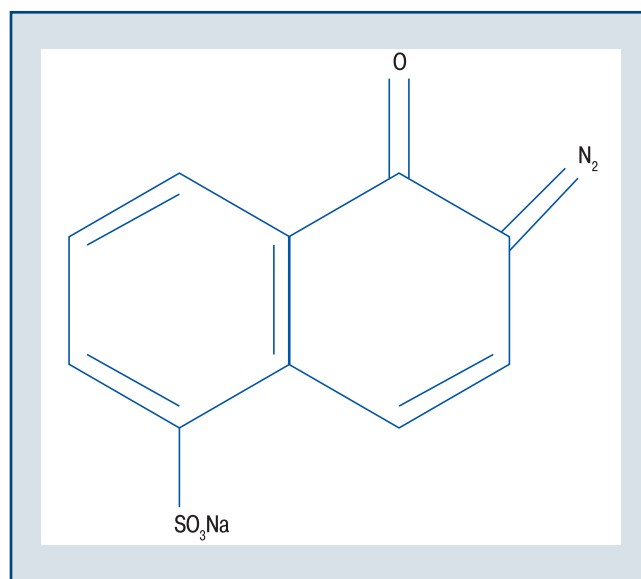
Микроэлектроника — главная сфера применения фоторезистов на основе НХД, и с ее развитием остро встает вопрос о качественных наноразмерных фоторезистах, способных к фотолитографическому процессу в микронном и субмикронном размерном пространстве [2]. В полиграфии фоторезистивный процесс создания литографических печатных форм уступил место более прогрессивным технологиям, однако некоторые технологические задачи по-прежнему требуют применения диазотипирования — вопрос разрешающей способности здесь стоит не менее остро, ведется изучение радиационно-индуцированных процессов в фоторезистах [3, 4]. Выполняется работа в смежных областях — например, вырабатываются критерии по отбору состава проявителей для позитивных фоторезистов [5]. Многообещающе выглядит использование НХД в быстро развивающейся сфере доставки лекарственных препаратов в эпицентры онкологических опухолей [6], а также виден потенциал НХД для применения в синтезе других веществ, спектр медицинского использования которых крайне широк [7, 8].

Авторы не ставят перед собой задачи охватить весь спектр применения НХД в современной промышленности, что является вопросом, скорее, большой обзорной статьи, чем краткого введения к описанию решения прикладной задачи, но уже из этого небольшого введения видно, что НХД востребованы производствами и синтезируются в промышленных масштабах. На территории Российской Федерации одним из ведущих производителей НХД является ФГУП «ГНЦ «НИОПИК», предоставивший образцы для исследований.

Безопасность химических производств и технологических процессов, протекающих на них, — всегда приоритетная задача. Особое внимание следует уделять производствам, на которых синтезируются, обращаются, хранятся и утилизируются нестабильные, склонные к экзотермическому превращению при относительно невысоких температурах соединения. Как будет показано далее, НХД входят в их число. Расчет параметров теплового взрыва для таких веществ позволит узнать об условиях, при которых взрыв из потенциально вероятного события может стать реальностью, а главное — не допустить их создания на производстве. Авторы работы ставят перед собой прикладную задачу определения температуры самовоспламенения (вспышки) достаточно нестабильных веществ, которая способствует увеличению безопасности на

производстве без проведения масштабных экспериментов.

В качестве образцов для исследования взяты два классических НХД, которые могут как выступать в качестве самостоятельного фоторезиста, так и быть полупродуктом для изготовления многих позитивных и обратимых фоторезистов на разнообразных подложках. Рассмотрены моносодиевая соль 1,2-нафтохинондиазид(2)-5-сульфокислоты (Краситель М, молярная масса 272,21 г/моль, эмпирическая формула  $C_{10}H_5N_2O_4SNa$ , структурная формула приведена на рис. 1, мелкодисперсное вещество ярко-желтого цвета, в воде не растворим) и 1,2-нафтохинондиазид(2)-5-сульфохлорида (Краситель N2, молярная масса 268,68 г/моль, эмпирическая формула  $C_{10}H_5N_2O_3SCl$ , структурная формула представлена на рис. 2, желто-зеленое вещество, частично растворимое в воде) [9].



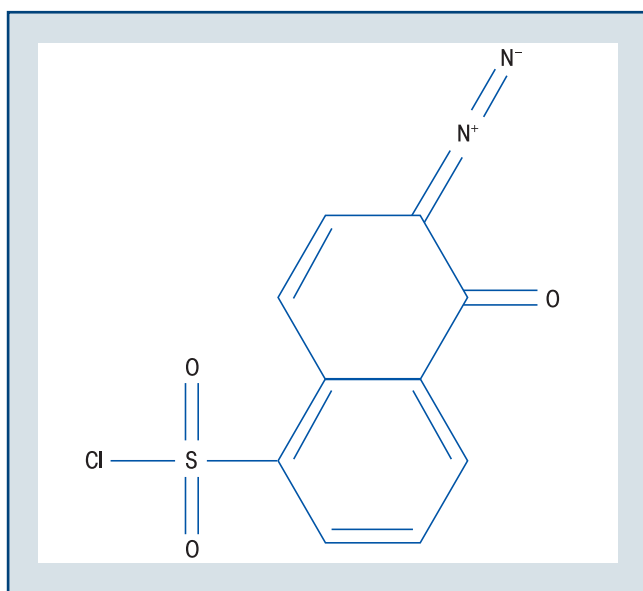
▲ Рис. 1. Структурная формула Красителя М  
▲ Fig. 1. Dye M structural formula

Образцы имеют в составе диазидную группу  $=N^+=N^-$  в энергетически активной хинондиазидной структуре, что обуславливает довольно низкую стабильность вещества при нормальных условиях (по ГОСТ 8.395—80\*) — на воздухе и свету вещества довольно быстро разлагаются и темнеют, однако неплохо сохраняются в темноте, в вакуум-эксикаторе.

#### Экспериментальные данные

Перед подходом к расчету авторы имели некоторый объем данных, в частности, данные термического анализа, из которых были получены кинетические параметры. Также благодаря термическому анализу и ИК-спектроскопии были сделаны предположения о протекании процесса разложения рассматри-

\* ГОСТ 8.395—80. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004500> (дата обращения: 10.05.2024).



▲ Рис. 2. Структурная формула Красителя N2  
▲ Fig. 2. Dye N2 structural formula

ваемых НХД. Оба вещества показали склонность к экзотермическому превращению как в окислительной среде (воздух), так и в инертной (гелий). В последнем случае потеря массы составила 10 % как для Красителя М, так и для Красителя N2, в сочетании с исчезновением «диазидного дублета» при 2200–2000 см<sup>-1</sup> из ИК-спектров после данного первичного акта термоллиза стало возможным говорить об отщеплении диазогрупп в форме молекулярного азота — это всегда экзотермическая реакция. Дополнительно было отмечено поведение образцов в ходе эксперимента, сходное с таковым у классических взрывчатых веществ.

Энергия активации первичного этапа термоллиза, который может быть описан уравнением скорости реакции первого порядка, полученная из данных термического анализа по методу Киссинджера для Красителя М, составила 117,4 кДж/моль при значении предэкспоненциального множителя  $\log A = 14,2$  ( $A, \text{с}^{-1}$ ). Для Красителя N2 энергия активации составила 102,9 при  $\log A = 11,9$  соответственно. Полученные данные указывают на низкую термическую стабильность веществ и сопоставимы с кинетическими параметрами термоллиза неорганических азидов. Дополнительно были получены значения экзотермических тепловых эффектов первой стадии термоллиза Красителя М и Красителя N2 — они составили соответственно 603 и 571 кДж/кг.

Подробности о результатах экспериментов можно узнать из работы [10], посвященной термической стабильности исследуемых веществ. Приведенные выше данные были использованы в дальнейших расчетах.

#### Расчетная часть

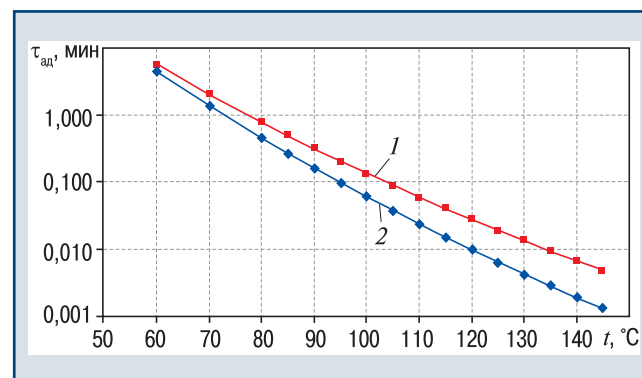
Тепловой взрыв — это резкий переход от медленной химической реакции к быстрому превращению, сопровождающемуся подъемом температуры, увели-

чением объема газов, во многих случаях — появлением пламени, что и наблюдалось в ходе экспериментов по термическому анализу и на установке ОТП<sup>1</sup>. Российский и зарубежный опыт в области обеспечения термической безопасности производственного объекта оперирует единым показателем — периодом индукции адиабатического теплового взрыва. Показатель универсален и может быть оценен на основе лабораторных данных с последующим масштабированием до промышленных объемов — размер и геометрия объекта не влияют на развитие теплового взрыва в адиабатических условиях. Данный показатель может быть рассчитан по классическому уравнению для скорости реакции 1-го порядка:

$$\tau_{\text{ад}} = \frac{C_p R T_0^2}{Q_r E_A A} \exp\left(\frac{E_A}{R T_0}\right), \quad (1)$$

где  $C_p$  — теплоемкость вещества при постоянном давлении, кДж/(кг·К);  $R$  — универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К·с),  $R = 0,008314$ ;  $T_0$  — начальная температура реакционной смеси, К;  $Q_r$  — теплота реакции разложения, кДж/кг;  $E_A$  — энергия активации, кДж/моль;  $A$  — предэкспоненциальный множитель, с<sup>-1</sup>.

Зависимости периода индукции адиабатического теплового взрыва для Красителей М и N2 от начальной температуры в диапазоне 60–145 °С, полученные по данным расчета, представлены на рис. 3 (здесь 1 — для Красителя М; 2 — для Красителя N2).



▲ Рис. 3. Зависимость периода индукции (мин) от начальной температуры (°С) для Красителей М и N2  
▲ Fig. 3. Dependence of induction period (min) on initial temperature (°C) for Dyes M and N2

Хотя кинетические параметры исследованных веществ и были определены в интервале 100–150 °С, проведенный расчет позволяет дать приближенную, но вполне достоверную оценку периода индукции и при более низких температурах. Сравнение полученных зависимостей  $\tau_{\text{ад}}(t)$  показывает, что периоды индукции у Красителей М и N2 довольно близки между собой.

<sup>1</sup> ГОСТ 12.1.044–89. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/40/4085.pdf> (дата обращения: 10.05.2024).

Зная период индукции адиабатического теплового взрыва, можно рассчитать рост температуры от времени разложения вещества по уравнению [11]:

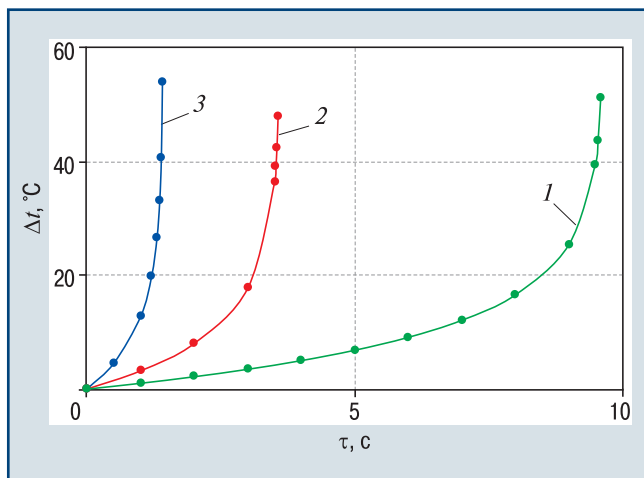
$$T = T_0 + \frac{\theta RT_0^2}{E}, \quad (2)$$

где  $T_0$  — начальная температура, К;  $\theta$  — безразмерный разогрев.

Безразмерный разогрев рассчитывали по уравнению [11]:

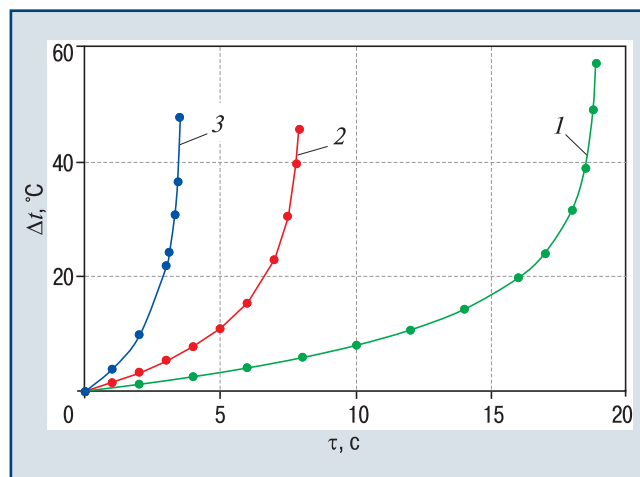
$$\theta = \ln \frac{\tau_{ad}}{\tau_{ad} - \tau}. \quad (3)$$

С помощью уравнений (2) и (3) можно рассчитать зависимости роста температуры ( $\Delta t = t - t_0$ ) вещества от времени при различной начальной температуре. Зависимости  $\Delta t$ , °С, от времени, с, для Красителя М при различной начальной температуре представлены на рис. 4 (здесь 1 — 90 °С; 2 — 100 °С; 3 — 110 °С). При температуре 90 °С на кривой можно выделить начальный участок медленного роста температуры и участок стремительного подъема температуры. С увеличением начальной температуры участок медленного роста температуры сокращается и при 110 °С полностью отсутствует (см. рис. 3). Зависимости роста температуры от времени для Красителя N2 (рис. 5, здесь 1 — 90 °С; 2 — 100 °С; 3 — 110 °С) при различной начальной температуре имеют такой же характер, как и для Красителя М.



▲ Рис. 4. Зависимость роста температуры от времени для Красителя М при различной начальной температуре  
▲ Fig. 4. Dependence of temperature rise on time for Dye M at various initial temperatures

Анализ полученных зависимостей показывает, что для каждого из веществ с течением времени линейная зависимость медленного роста (индукционный период) переходит в экспоненциальную зависимость. Заметно, что Красители М и N2 обладают довольно низкой термостойкостью. Показано, что медленное



▲ Рис. 5. Зависимость роста температуры от времени для Красителя N2 при различной начальной температуре  
▲ Fig. 5. Dependence of temperature rise on time for Dye N2 at various initial temperatures

разложение веществ в условиях отсутствия теплоотвода в течение короткого промежутка времени может перейти в стадию теплового взрыва.

Производство ФГУП «ГНЦ «НИОПИК» использует распылительную сушильную установку типа РС объемом 0,5 м<sup>3</sup>. Камера такой сушилки представляет собой цилиндр (если пренебречь газораспределительным устройством, в котором в нормальных условиях сушки продукта быть не должно) диаметром 1 м и высотой 1,5 м. При нарушении технологических параметров (например, повышение температуры) в сушильном аппарате могут начаться экзотермический процесс разложения продукта и тепловой взрыв.

Расчетную оценку критической температуры (температуры самовоспламенения) можно провести в рамках теории теплового взрыва с учетом возможного конвективного теплоотвода через стенку. Взрывоопасность реакционной смеси в технологическом оборудовании характеризуется критерием Н.Н. Семенова, равным отношению характерного времени охлаждения  $\tau_q$  к периоду индукции адиабатического теплового взрыва  $\tau_{ad}$ :

$$Se = \tau_q / \tau_{ad}$$

Увеличение критерия Se способствует развитию теплового взрыва, его критическое значение равно:

$$Se^* = 1/e = 0,368.$$

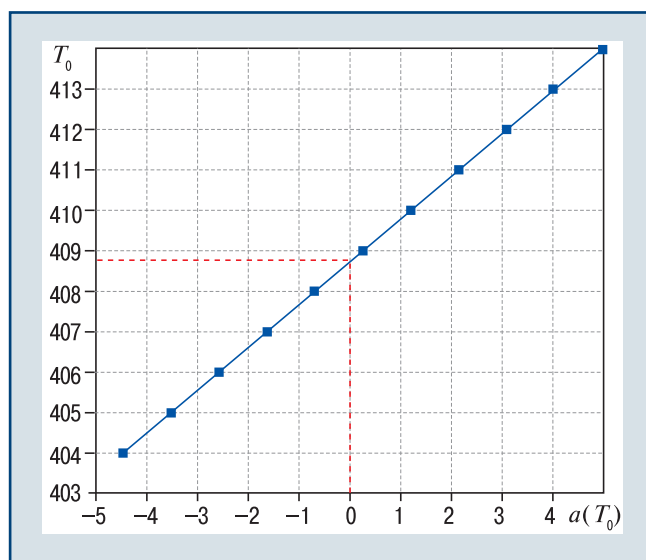
Расчет температуры самовоспламенения выполняли по уравнению:

$$T_* = \frac{E_A}{R \ln \frac{V d A E_A Q}{S N_{\text{ук}} T_0^2 C_v Se^*}}, \quad (4)$$



где  $T_*$  — температура самовоспламенения (вспышки), К;  $E_A$  — энергия активации реакции разложения, Дж/моль;  $V$  — объем сосуда, в котором происходит вспышка, м<sup>3</sup>;  $d$  — диаметр данного сосуда, м;  $Q$  — теплота реакции распада, Дж/г;  $S$  — площадь поверхности охлаждения сосуда, м<sup>2</sup>; Nu — критерий Нуссельта;  $\kappa$  — коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $C_v$  — теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(г·К).

Расчет по уравнению (4) проводился через построение графика в программе Mathcad. Задавалась температура расчета с шагом в один градус, затем находилось расчетное значение, при котором разница между заданным и полученным значениями становилась нулевой. Полученные построения приведены на рис. 6, 7 (здесь  $T_0$  — искомая температура вспышки;  $a(T_0)$  — диапазон поиска), температура показана в К.

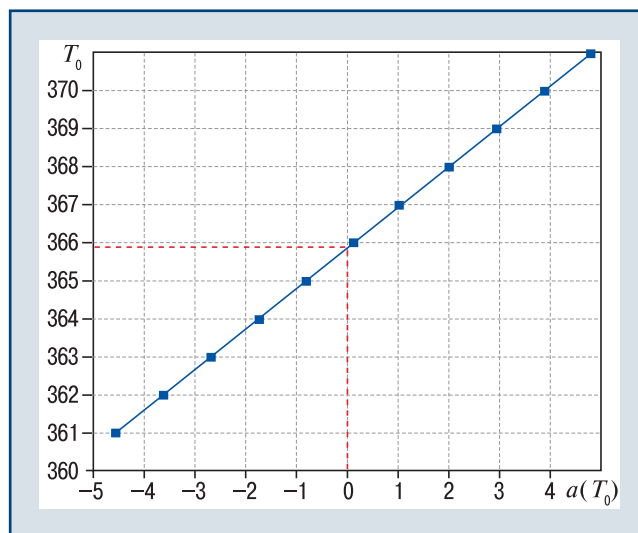


▲ Рис. 6. Графическое определение температуры самовоспламенения Красителя М  
▲ Fig. 6. Graphical determining of self-ignition temperature for Dye M

Таким образом, для Красителя М была получена температура самовоспламенения, равная 135 °С, а для Красителя N2 — 93 °С. Полученные данные крайне близки значениям, полученным с использованием в расчете теоретической ячейки [12].

#### Заключение

Тщательное изучение процесса термического разложения Красителей М и N2 показывает, что классический безмодельный подход к безопасности ведения технологических процессов («вести процесс при температуре на 20–40 °С ниже критической») не всегда способен действительно повысить безопасность процесса, в особенности в условиях затрудненного теплоотвода. В данном случае такой подход точно не сработает для Красителя М и будет не очень удачен для Красителя N2 — периоды индукции при таком подходе будут сравнительно небольшими, меньше времени средней производственной смены (8 ч).



▲ Рис. 7. Графическое определение температуры самовоспламенения Красителя N2  
▲ Fig. 7. Graphical determining of self-ignition temperature for Dye N2

Используя классическое уравнение для скорости реакции 1-го порядка и проводя интерполяцию до более низких температур, можно найти безопасные режимы сушки для рассмотренных красителей. Периоды индукции составят десятки часов, если рабочие температуры будут оставаться в пределах 40–45 °С. Данные результаты необходимо использовать при выборе безопасных температурных режимов сушки исследованных соединений.

#### Список литературы

1. О внесении изменений в Программу фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы: распоряжение Правительства Рос. Федерации от 31 окт. 2015 г. № 2217-р. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_188482/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_188482/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/) (дата обращения: 10.05.2024).
2. Direct optical lithography of colloidal metal oxide nano-materials for diffractive optical elements with  $2\pi$  phase control/ J.A. Pan, Z. Rong, Y. Wang et al.// Journal of the American Chemical Society. 2021. Vol. 143. № 5. P. 2372–2383. DOI: 10.1021/jacs.0c12447
3. Radiation-Induced Processes in Diazoquinone–Novolac Resist Films under Irradiation with  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -Rays/ S.D. Brinkevich, D.I. Brinkevich, V.S. Prosolovich, R.L. Sverdlov// High Energy Chemistry. 2021. Vol. 55. № 1. P. 65–74. DOI: 10.1134/s0018143921010070
4. Brinkevich S.D., Brinkevich D.I., Prosolovich V.S. Modification of Diazoquinone–Novolac Photoresist Films by the Implantation of Antimony Ions// Russian Microelectron. 2021. Vol. 50. № 1. P. 33–38. DOI: 10.1134/S1063739720060025
5. Лысич Д.В. Использование параметра растворимости для подбора растворителей термообработанных полимерных позитивных фоторезистных масок, применяемых во «взрывной» фотолитографии// Вестник ЮУрГУ. Сер. «Химия». 2017. Т. 9. № 3. С. 26–36. DOI: 10.14529/chem170304

6. *Design, synthesis and anticancer activity of 2-amidomethoxy-1,4-naphthoquinones and its conjugates with Biotin/polyamine*/ M. Manickam, P.R. Boggu, T. Pillaiyar et al.// *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*. 2021. Vol. 31. DOI: 10.1016/j.bmcl.2020.127685

7. *Maurya H.K. Synthetic and biological utility of 2,3-dichloro-1,4-naphthoquinone: A Review*// *International Journal of Research — Granthaalayah*. 2020. Vol. 7. Iss. 10. P. 293–347. DOI: 10.5281/zenodo.3525162

8. *New naphthoquinone derivatives against glioma cells*/ M. Redaelli, C. Mucignat-Caretta, A.A. Isse et al.// *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2015. Vol. 96. P. 458–466. DOI: 10.1016/j.ejmech.2015.04.039

9. *Скопенко В.В., Калибачук В.А. Светочувствительные диазонафтолы*. Киев: Выща школа, 1988. 200 с.

10. *Способность нафтохинондиазидных фоторезистов к экзотермическому разложению*/ А.Н. Шушпанов, А.Я. Васин, В.М. Райкова, Г.Г. Гаджиев// *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 10. С. 90–96. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-90-96

11. *Бенин А.И. Программный комплекс «Тепловой взрыв» (TSS). Научные основы и методология*. СПб: Литео, 2017. 672 с.

12. *Шушпанов А.Н. Пожаровзрывоопасность ряда нафтохинондиазидных фоторезистов: дис. ... канд. техн. наук*. М., 2021. 178 с.

#### References

1. On the introduction of changes into the Program of Fundamental Scientific Studies at the State Academies of Science for 2013–2020: the Resolution of the Government of the Russian Federation of October 31, 2015, № 2217-р. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_188482/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_188482/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/) (accessed: May 10, 2024). (In Russ.).

2. Pan J.A, Rong Z., Wang Y., Cho H., Coropceanu I., Wu H., Talapin D.V. Direct optical lithography of colloidal metal oxide nanomaterials for diffractive optical elements with  $2\pi$  phase control. *Journal of the American Chemical Society*. 2021. Vol. 143. № 5. pp. 2372–2383. DOI: 10.1021/jacs.0c12447

3. Brinkevich S.D., Brinkevich D.I., Prosolovich V.S., Sverdlov R.L. Radiation-Induced Processes in Diazoquinone–Novolac Resist Films under Irradiation with  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -Rays. *High*

*Energy Chemistry*. 2021. Vol. 55. № 1. pp. 65–74. DOI: 10.1134/S0018143921010070

4. Brinkevich S.D., Brinkevich D.I., Prosolovich V.S. Modification of Diazoquinone–Novolac Photoresist Films by the Implantation of Antimony Ions. *Russian Microelectron*. 2021. Vol. 50. № 1. pp. 33–38. DOI: 10.1134/S1063739720060025

5. Lysich D. Using Solubility Parameter for Selection of Solvents for Thermo-Processed Polymer Positive Photoresist Masks Applied in «Lift-Off» Photolithography. *Vestnik YuUrGU. Ser. «Khimiya» = Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*. 2017. Vol. 9. № 3. pp. 26–36. (In Russ.). DOI: 10.14529/chem170304

6. Manickam M., Boggu P.R., Pillaiyar T., Nam Y.J., Abdullah Md., Lee S.J., Kang J.S., Jung S.-H. Design, synthesis and anticancer activity of 2-amidomethoxy-1,4-naphthoquinones and its conjugates with Biotin/polyamine. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*. 2021. Vol. 31. DOI: 10.1016/j.bmcl.2020.127685

7. Maurya H.K. Synthetic and biological utility of 2,3-dichloro-1,4-naphthoquinone: A Review. *International Journal of Research — Granthaalayah*. 2020. Vol. 7. Iss. 10. pp. 293–347. (In Russ.). DOI: 10.5281/zenodo.3525162

8. Redaelli M., Mucignat-Caretta C., Isse A.A., Gennaro A., Pezzani R., Pasquale R., Pavan V., Crisma M., Giovanni R., Zagotto G. New naphthoquinone derivatives against glioma cells. *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2015. Vol. 96. pp. 458–466. DOI: 10.1016/j.ejmech.2015.04.039

9. Skopenko V.V., Kalibabchuk V.A. Light-sensitive diazonaphthols. Kyiv: Vyshcha shkola, 1988. 200 p. (In Russ.).

10. Shushpanov A.N., Vasin A.Ya., Raykova V.M., Gadzhiev G.G. Ability of Naphthoquinondiazide Photoresists to Exothermic Decomposition. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2020. № 10. pp. 90–96. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-90-96

11. Benin A.I. Software Package «Thermal Explosion» (TSS). Scientific methods and methodology. Saint Petersburg: LITEO, 2017. 672 с. (In Russ.).

12. Shushpanov A.N. Explosion and fire hazard of a number of naphthoquinondiazide photoresists: abstract of the thesis ... Candidate of Technical Sciences. Moscow, 2021. 178 p. (In Russ.).

**E-mail: shoo@count0.ru**

*Материал поступил в редакцию/ Received 14.05.2024*

*После рецензирования/ Revised 17.06.2024*

*Принят к публикации/ Accepted 20.07.2024*

