



УДК: 541.11:541.127:542.61

DOI: 10.26277/SECNRS.2025.115.1.004

© 2025. Все права защищены.

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРЕВА И ДИАМЕТРА РЕАКЦИОННОГО СОСУДА НА ТЕМПЕРАТУРУ НАЧАЛА ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА МОНОЭТАНОЛАМИНА В АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРАХ

Соколов И. П.\* , д-р хим. наук (isokolov@secnrs.ru),

Смирнов А. В.\*\* (meller1@yandex.ru),

Белова Е. В.\*\* , канд. хим. наук (bl174@bk.ru)

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2025 г.

### Аннотация

Применительно к оценке потенциальной взрывоопасности моноэтанолamina, возникающей при концентрировании его азотнокислых растворов в процессах переработки сбросных вод АЭС, изучено влияние скорости нагрева и диаметра аппарата на температуру начала перехода реакции моноэтанолamina и  $\text{HNO}_3$  с образованием молекулярного азота в режим теплового взрыва. Термический анализ проводили в герметичных сосудах методами дифференциальной сканирующей калориметрии и нагрева в автоклаве. Определены экспериментальные зависимости температуры начала теплового взрыва от скорости нагрева. На основании экспериментальных и расчетных данных оценено влияние диаметра сосуда на температуру начала теплового взрыва. Отмечено изменение механизма реакции с увеличением температуры, концентрации  $\text{HNO}_3$  и скорости нагрева. Приведено графическое построение совмещенной  $T-C-d$  диаграммы с изменяющимися границами области взрываемости.

► **Ключевые слова:** моноэтанолamin, азотная кислота, дифференциальная сканирующая калориметрия, графический подход, тепловой взрыв, области взрываемости.

\* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

\*\* Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук, Москва, Россия.

## ON THE INFLUENCE OF HEATING RATE AND REACTION VESSEL DIAMETER ON THE ONSET TEMPERATURE OF THE THERMAL EXPLOSION OF MONOETHANOLAMINE IN NITRIC ACID SOLUTIONS

Sokolov I. P.\*, D. Sc.,  
Smirnov A. V.\*\*,  
Belova E. V.\*\*, Ph. D.

The article was received by the editors' crew on February 25<sup>th</sup>, 2025.

### *Abstract*

*In the context of assessing the potential explosion hazard of monoethanolamine during the concentration of its nitric acid solutions in NPP wastewater treatment processes, the influence of heating rate and apparatus diameter on the onset temperature of the transition of monoethanolamine–HNO<sub>3</sub> reaction to the thermal explosion regime with molecular nitrogen formation was studied. Thermal analysis was carried out in sealed vessels using differential scanning calorimetry and autoclave heating methods. Experimental dependencies of the thermal explosion onset temperature on the heating rate were determined. Based on the experimental and calculated data, the effect of the vessel diameter on the thermal explosion onset temperature was evaluated. A change in the reaction mechanism was observed with increasing temperature, HNO<sub>3</sub> concentration, and heating rate. A graphical plot of a combined T–C–d diagram with variable explosive range limits is presented.*

► **Keywords:** *monoethanolamine, nitric acid, differential scanning calorimetry, graphical approach, thermal explosion, explosive ranges.*

\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

\*\* A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

## Введение

На объектах использования атомной энергии применяют ряд технологий, в которых азотно-кислые водные растворы содержат органические соединения или контактируют с органическими фазами. К ним относятся экстракционные и сорбционные процессы переработки отработавшего ядерного топлива, а также технологические операции с использованием различных функциональных добавок.

При концентрировании азотнокислых растворов, содержащих органические компоненты, в результате их упаривания при повышенных температурах создаются условия для интенсификации экзотермических окислительно-восстановительных реакций между азотной кислотой и органическими соединениями с переходом их в режимы горения или взрыва. Такие неуправляемые химические экзотермические реакции сопровождаются ростом давления в аппаратах, приводящего к их деформации, разгерметизации и разрыву с выходом из них радиоактивных веществ. Поэтому исследование причин и условий протекания аварийных взрывов на объектах использования атомной энергии является важной составляющей обоснования их ядерной и радиационной безопасности по отношению к персоналу, населению и окружающей среде.

Результаты первоначального этапа термических исследований пожаровзрывобезопасности экстракционных и сорбционных систем, применяемых на объектах ядерного топливного цикла, были систематизированы в монографии [1]. На их основе были разработаны рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности данных технологических процессов [2]. В работе [3] в обобщенном виде показан характер влияния технологических параметров на границу перехода неуправляемых химических экзотермических реакций в режим взрыва и на смещение этой границы при изменении значений технологических параметров.

Разработанные термические методы исследования систем, содержащих азотную кислоту и органические соединения, широко используются при обосновании пожаровзрывобезопасности перспективных для внедрения на объектах ядерного топливного цикла экстрагентов и сорбентов [4, 5], а также для оценки их потенциальной взрывоопасности.

В данной работе термические методы анализа использованы для выявления неисследованных ранее факторов на взрывоопасность азотнокислых растворов моноэтаноламина (МЭА), который

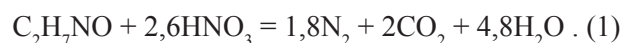
применяется для обеспечения необходимого водно-химического режима второго контура атомных электростанций [6]. В процессах переработки сбросных вод, содержащих МЭА, посредством их выпаривания или методом ионного обмена происходит концентрирование реагентов, приводящее к взаимодействию МЭА с  $\text{HNO}_3$  в режиме взрыва.

Термодинамическая оценка, проведенная в [7], показала, что наибольшие адиабатические температуры продуктов взаимодействия МЭА с  $\text{HNO}_3$  достигаются по реакции с образованием молекулярного азота. Поэтому данная реакция была принята в качестве основной при проведении экспериментального исследования данной системы, результаты которого были опубликованы в [8].

Поскольку для объектов использования атомной энергии характерно осуществление технологических процессов в герметичном оборудовании, особый интерес при оценке взрывоопасности системы МЭА с  $\text{HNO}_3$  с образованием  $\text{N}_2$  представляли данные [8], относящиеся к нагреву образцов в автоклаве. При этом реализуются наиболее благоприятные условия для возникновения теплового взрыва.

Детальный анализ экспериментальных данных, полученных при нагреве образцов в автоклаве, позволил в [9] определить границу перехода реакции МЭА с  $\text{HNO}_3$  в режим взрыва при использовании герметичного сосуда диаметром 3,5 см на температурно-концентрационной диаграмме.

Данная работа является продолжением исследования [9], ее целью было определение влияния скорости нагрева и диаметра герметичного сосуда на температуру начала теплового взрыва при взаимодействии МЭА с  $\text{HNO}_3$  с фиксированным соотношением реагентов, соответствующим стехиометрии реакции с выделением молекулярного азота:



### Определение влияния скорости нагрева на температуру начала теплового взрыва

Важным технологическим параметром, влияющим на условия возникновения теплового взрыва, является скорость нагрева взрывоопасной среды до заданной температуры. Для анализа влияния этого фактора на термическую устойчивость исследуемой системы использовали два метода нагрева образцов, помещенных в герметичные сосуды:

1) нагрев в автоклаве при заданной температуре термостата;

2) дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) при фиксированной скорости нагрева.

Методика проведения экспериментов в автоклаве с образцами объемом 30 см<sup>3</sup>, помещенными в герметичный тигель диаметром 3,5 см, описана в предыдущей статье [9]. По результатам экспериментального исследования определяли усредненные скорости нагрева образцов до начала теплового взрыва, характеризуемого резким повышением температуры и давления, который происходил при температуре ниже установленной температуры термостата.

Дифференциально-сканирующую калориметрию осуществляли на приборе ДСК-500 производства СамГТУ. Во взвешенный пустой тигель диаметром 0,45 см с помощью микрошприца помещали образец исследуемого раствора объемом (8–10) 10<sup>-3</sup> см<sup>3</sup>. Тигель закрывали крышкой, сверху которой находились тефлоновая прокладка и алюминиевое кольцо. После помещения тигля в пресс-форму ручным прессом с усилием 65–70 кг запрессовывали алюминиевое кольцо. Герметичный тигель с образцом взвешивали для контроля потери массы в случае его разгерметизации и осуществляли программированный нагрев со скоростью в диапазоне 0,5–5 К/мин в температурном интервале 50–250 °С. После опыта тигель взвешивали и при изменении массы не более 1 мг считали, что герметичность сосуда не была нарушена. Для определения теплового эффекта химического взаимодействия реагентов использовали данные калибровки ДСК по плавлению стандартного образца – индия.

При проведении экспериментов методом ДСК содержание реагентов соответствовало их наибольшему количеству, используемому ранее при нагреве образцов в автоклаве (4,88 моль/л HNO<sub>3</sub>). Полученные результаты приведены в таблице и на рис. 1.

Рис. 1 иллюстрирует типичное взаимное расположение пиков кривых ДСК и их относительных высот с увеличением скорости нагрева образцов. По величине интегрального теплового потока оценили тепловой эффект реакции равный 1 430 ± 170 Дж/г смеси.

По полученным экспериментальным результатам были построены: зависимость между температурой начала пика ДСК и скоростью нагрева образцов (линия 1 на рис. 2), а также зависимость температуры начала теплового взрыва от усредненной скорости нагрева в автоклаве до этой температуры (линия 2 на рис. 2).

Сравнение полученных зависимостей показывает, что для одинаковой скорости нагрева температуры начала экзотермического пика на кривых ДСК превышают значения температур начала теплового взрыва, что может быть обусловлено увеличением удельных тепловых потерь при уменьшении массы образца.

Как следует из рис. 2, линии 1 и 2 при увеличении скорости нагрева сближаются. Это можно объяснить тем, что при высокой скорости нагрева вне зависимости от размера образца экзотермическая реакция интенсифицируется в приграничном со стенкой сосуда тонком слое. В качестве аналогии можно привести проявление скин-эффекта при высокоскоростном индукционном нагреве.

Отмеченное сближение линий 1 и 2 на рис. 2 позволяет использовать результаты ДСК, полученные при высоких скоростях нагрева образцов, для оценки температур начала теплового взрыва в образцах большего размера. Использование такой возможности показано на рис. 3, на котором нанесены значения температур начала теплового взрыва в зависимости от усредненной скорости нагрева до этих температур, полученные при проведении

Таблица

**Температура начала экзотермической реакции ( $T_{ст}$ ) и максимальная температура раствора ( $T_{макс}$ ) в зависимости от скорости нагрева 8,1 % моноэтаноламина и 26,5 % азотной кислоты**  
**The onset temperature of the exothermic reaction ( $T_{st}$ ) and the maximum temperature of the solution ( $T_{max}$ ) depending on the heating rate of 8,1 % MEA and 26,5 % nitric acid**

Скорость нагрева, К/мин	Параметр	
	$T_{ст}$ , °С	$T_{макс}$ , °С
0,5	112,6	121,7
1,0	114,3	128,0
2,0	118,3	136,6
5,0	130,9	150,3

экспериментов в автоклаве применительно к содержанию  $\text{HNO}_3$  4,88 моль/л.

Линия 1 на рис. 3 соответствует случаям, когда тепловой взрыв происходит в результате выдержки образца при температуре термостата, линия 2 – когда тепловой взрыв происходит до достижения температуры термостата, линия 3 указывает на значения температуры термостата, которые не достигались при начале возникновения взрыва. Линия 1 ограничивается критическим значением

температуры для данного состава реакционной смеси (точка 4 на рис. 1). Точка раздвоения линии 1 на линии 2 и 3 указывает на начало изменения механизма протекания экзотермического процесса.

С учетом этого, на рис. 3 можно выделить следующие области изменения рассматриваемых параметров для данных условий проведения экспериментов:

- I – тепловой взрыв невозможен ни при какой скорости нагрева до критической температуры  $T_1$ ;

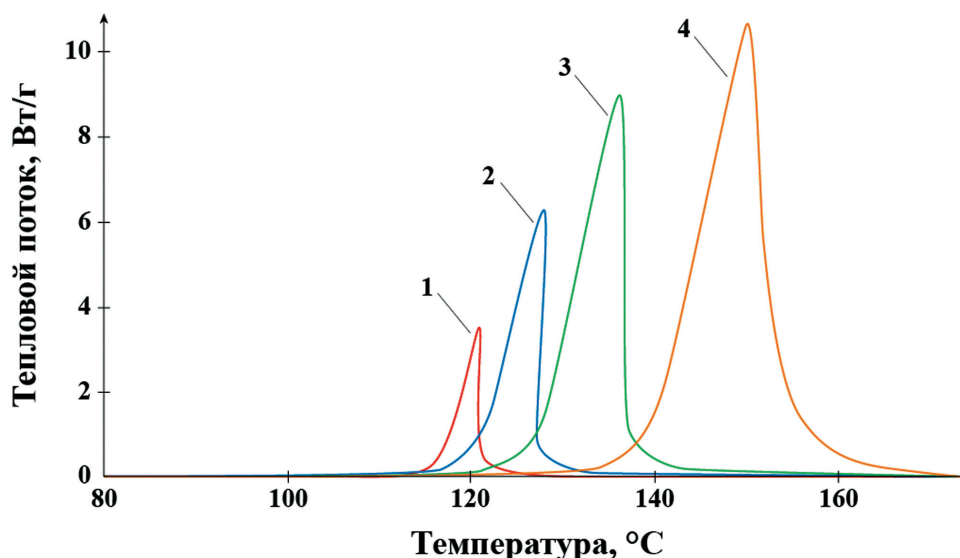


Рис. 1. Термограмма раствора 26,5 % азотной кислоты и 8,1 % моноэтаноламина при скоростях нагрева 0,5 К/мин (1), 1 К/мин (2), 2 К/мин (3), 5 К/мин (4)  
 [Fig. 1. Thermogram of a solution of 26,5 % nitric acid and 8,1 % monoethanolamine at heating rates of 0,5 K/min (1), 1 K/min (2), 2 K/min (3), 5 K/min (4)]

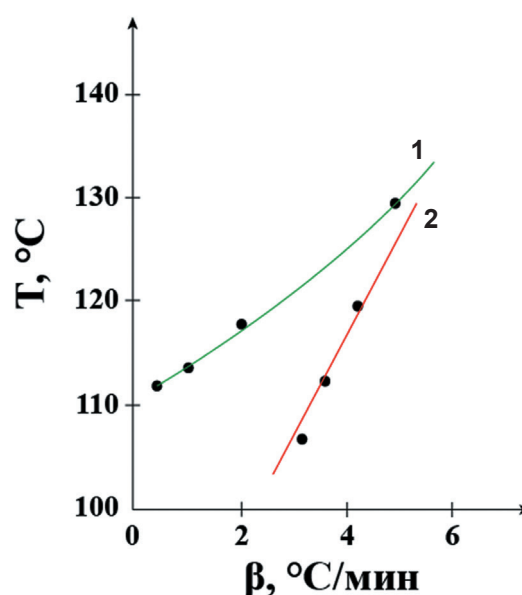


Рис. 2. Зависимости температуры начала пиков на кривых дифференциальной сканирующей калориметрии (1) и температур начала теплового взрыва в автоклаве (2) от скорости нагрева образцов при содержании  $\text{HNO}_3$  4,88 моль/л  
 [Fig. 2. Dependences of the peak onset temperatures on the differential scanning calorimetry curves (1) and the onset temperatures of thermal explosion in the autoclave (2) on the heating rate of the samples with an  $\text{HNO}_3$  content of 4,88 mol/L]

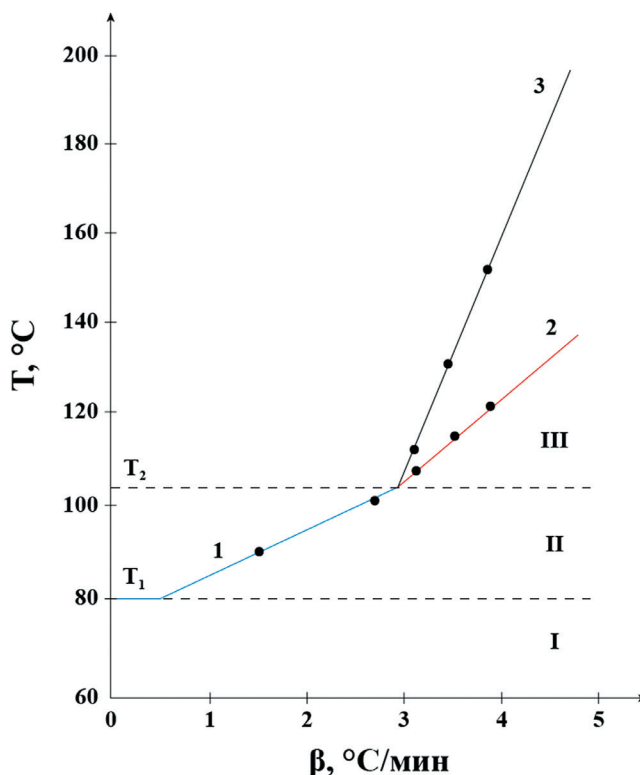


Рис. 3. Области режимов (I, II, III) протекания реакции моноэтаноламина с  $\text{HNO}_3$  (4,88 моль/л) на зависимости температуры начала теплового взрыва от скорости нагрева:

- 1 – тепловой взрыв при температуре термостата;
- 2 – тепловой взрыв до достижения температуры термостата;
- 3 – температура термостата

[Fig. 3. Ranges of modes (I, II, III) of the reaction of monoethanolamine with  $\text{HNO}_3$  (4,88 mol/L) for the dependence of the onset temperature of thermal explosion on the heating rate:

- 1 – thermal explosion at thermostat temperature;
- 2 – thermal explosion before reaching thermostat temperature;
- 3 – thermostat temperature]

- II – тепловой взрыв возможен при выдержке в термостате с температурой в интервале  $T_1 - T_2$  и скорости нагрева образцов до 3 К/мин;

- III – тепловой взрыв возможен до достижения установленной температуры термостата при скоростях нагрева свыше 3 К/мин.

Если экстраполировать линии 2 и 3 на рис. 3 (в соответствии со сближением линий 1 и 2 на рис. 3), то можно оценить температуры начала взрыва анализируемой системы за пределами изученных значений параметров. Например, согласно рис. 3, можно ожидать, что при увеличении температуры термостата до 200 °С скорость нагрева достигнет порядка 5 К/мин, и тепловой взрыв начнется при достижении около 135 °С.

#### Оценка влияния диаметра реакционного сосуда на температуру начала теплового взрыва

При проведении экспериментов методом ДСК с образцами объемом 8–10 мкл, помещаемыми

в сосуд с диаметром 0,45 см, не было зафиксировано повышения давления, приводящего к его разгерметизации. Напротив, при использовании образцов объемом 30 мл, помещаемых в сосуд с внутренним диаметром 3,5 см, в аналогичных опытах тепловые взрывы имели место и сопровождалась скачками давления в диапазоне 20–49 атм. Эти данные находятся в согласии с теорией теплового взрыва Н. Н. Семёнова. Известно, что данная теория допускает наличие критического размера образца, менее которого тепловой взрыв становится невозможным из-за больших тепловых потерь.

Используя формализм теории теплового взрыва, можно на основе полученных результатов оценить влияние размера сосуда на температуру начала теплового взрыва МЭА в азотнокислых растворах. Известно, что скорость взрывоопасной реакции пропорциональна квадрату диаметра сосуда, в котором находится химическая система [3]. С учетом этого, для одной и той же химической системы

в случае одинаковых условий нагрева образцов можно записать соотношения:

$$K d_1^2 e^{-E/RT(1)} = K d_2^2 e^{-E/RT(2)} = q, \quad (2)$$

где  $K$  – постоянный коэффициент, в который входят фиксированные параметры, определяющие скорость тепловыделения в зоне реакции;

$q$  – тепловой поток из зоны реакции, при котором возникает тепловой взрыв, который можно принять одинаковым для одинаковых условий проведения экспериментов;

$d$  – диаметр сосуда;

$E$  – энергия активации;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – температура, соответствующая началу теплового взрыва.

Для данного конкретного случая постулируется [10], что на диаграмме Семёнова находится одна прямая линия, соответствующая тепловому потоку из зоны реакции, и несколько кривых, соответствующих скоростям тепловыделения и имеющих точки касания с этой прямой в различных местах.

Для указанных ограничений получаем соотношение:

$$d_1^2 e^{-E/RT(1)} = d_2^2 e^{-E/RT(2)}, \quad (3)$$

из которого по известным значениям  $d_1$  и  $T$  (1) можно определить значение  $T$  (2) для сосуда другого диаметра  $d_2$ .

Значение  $E/R$ , необходимое для решения (3), можно получить, используя известное уравнение Аменомия – Цветановича:

$$\ln(\beta / T_m^2) = \ln(E / k_0 R) - E/R (1 / T_m), \quad (4)$$

где  $\beta$  – скорость нагрева образца при использовании метода ДСК;

$T_m$  – температурные значения максимумов пиков на кривых ДСК;

$k_0$  – предэкспоненциальный множитель в кинетическом уравнении Аррениуса.

Согласно (4), отношению  $E/R$  соответствует наклон прямой на графике с координатами  $\ln(\beta / T_m^2)$  и  $1 / T_m$ .

Используя данные, приведенные в таблице, по (4) было оценено значение энергии активации, равное 113,4 кДж/моль.

Исходной информацией для проведения оценочных расчетов по (3) послужила критическая зависимость между температурой начала теплового

взрыва и концентрацией азотной кислоты, показанная на рис. 1 в работе [9]. Она же приведена в качестве исходной на рис. 4 для реакционного сосуда диаметром 3,5 см. На рис. 4 показана совмещенная комплексная  $T-C-d$  диаграмма с координатами: температура начала теплового взрыва – концентрация  $\text{HNO}_3$  – диаметр реакционного сосуда, на которой представлены результаты оценочных вычислений по (3), дополненные соответствующими графическими построениями, как это было рассмотрено на рис. 1 в [9].

На левом верхнем графике рис. 4 показана полученная по результатам расчета серия критических зависимостей температуры начала теплового взрыва от диаметра реакционного сосуда для используемых при проведении экспериментов концентраций  $\text{HNO}_3$ . Из этого графика следует, что для всех значений концентрации  $\text{HNO}_3$  температура начала теплового взрыва резко возрастает с уменьшением диаметра сосуда и постепенно снижается при его увеличении.

Процедура графического построения критических зависимостей температуры от состава системы для разных диаметров реакционного сосуда показана на рис. 4 на примере сосуда диаметром 6 см. По точкам пересечения прямой, соответствующей этому диаметру, с кривыми, относящимися к  $C_2, C_3, C_4$  (точки 1, 3, 5), определены соответствующие температуры, а по ним и значениям концентрации установлены искомые точки критической зависимости (2, 4, 6).

На верхнем правом графике рис. 4 показано, что при увеличении диаметра сосуда происходит сдвиг области взрываемости в сторону более низких температур и концентраций  $\text{HNO}_3$ , причем для одного шага уменьшения размера диаметра ( $\Delta = 2,5$  см) искомые зависимости сходятся и при больших значениях диаметров будут незначительно отличаться друг от друга. На этом же графике помещена рассчитанная зависимость, относящаяся к размеру сосуда, используемого при проведении анализа методом ДСК (0,45 см), и нанесены точками значения температур начала тепловыделения, приведенные в таблице. Три из этих значений оказались ниже оценочной зависимости, одно – выше. Это свидетельствует в пользу того, что теплоотвод от образцов при использовании ДСК мог быть выше, чем при проведении экспериментов в автоклаве, вследствие чего критическая температура должна смещаться в сторону более высоких температур. Условно это показано на графике в виде пунктирной линии.

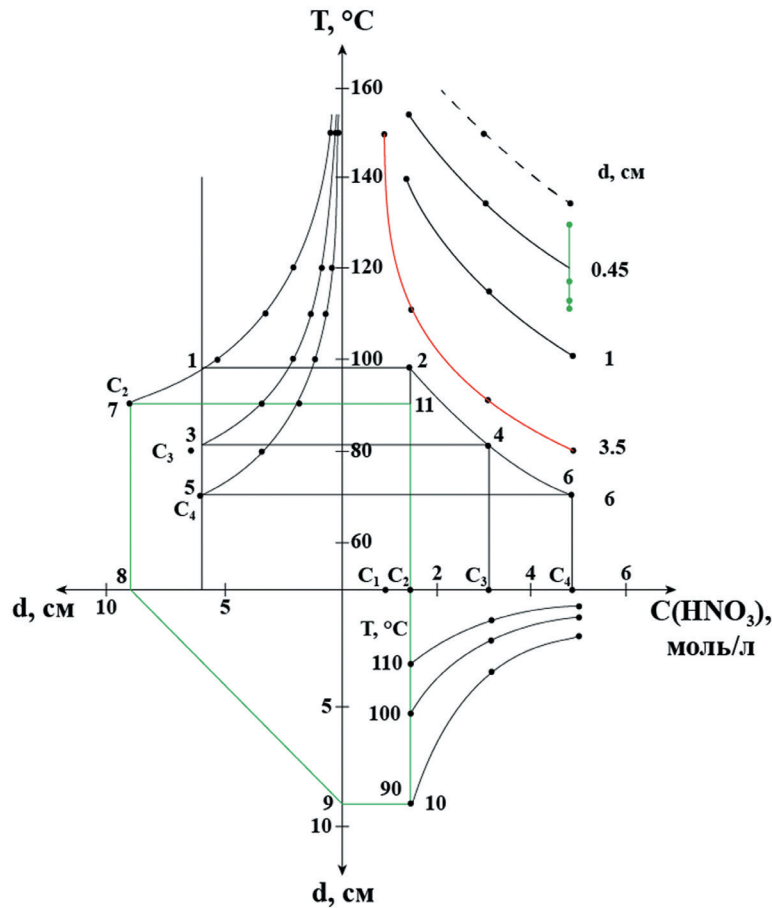


Рис. 4. Сводная  $T-C-d$  диаграмма взрываемости моноэтаноламина в азотнокислых растворах  
 [Fig. 4. Summary  $T-C-d$  diagram of monoethanolamine explosibility in nitric acid solutions]

Используя эти графики посредством графических построений, был получен нижний график на рис. 4, на котором изображены критические зависимости между диаметром реакционного сосуда и концентрацией  $HNO_3$  для разных температур начала теплового взрыва. Пример установления соответствия координат конфигуративной точки с фиксируемым значением параметров  $T$ ,  $C$  и  $d$  на всех трех графиках показан на рис. 4 в виде замкнутого контура с точками 7, 8, 9, 10, 11, где точки 7, 10, 11 имеют одинаковый набор значений всех трех параметров. При этом точке 11, согласно левому верхнему графику, соответствует диаметр сосуда, равный 9 см. В соответствии с нижним графиком, следует ожидать снижение температуры начала теплового взрыва с увеличением диаметра реакционного сосуда и концентрации  $HNO_3$  в реакционной системе.

### Выводы

1. Применительно к оценке потенциальной взрывоопасности МЭА при концентрировании его азотнокислых растворов в процессе переработки сбросных вод АЭС методами ДСК и нагрева

в термостате в герметичных сосудах при соотношении МЭА:  $HNO_3 = 1:2,6$  и концентрации  $HNO_3$  4,88 моль/л для интервала скоростей нагрева 0,5–5 К/мин определены зависимости увеличения температур начала пиков ДСК (от 113 до 180 °С) и температур начала теплового взрыва в автоклаве (от 106 до 120 °С). Установлено, что при скорости нагрева свыше 3 К/мин реакция между МЭА и  $HNO_3$  переходит в режим взрыва до достижения температуры термостата, а при скорости нагрева свыше 5 К/мин происходит сближение обеих зависимостей. Отмечена смена режимов возникновения теплового взрыва при увеличении скорости нагрева в автоклаве.

2. На основании теории теплового взрыва оценена критическая зависимость перехода реакции окисления МЭА азотной кислотой в режим взрыва для сосудов различных диаметров, и построена совмещенная  $T-C-d$  диаграмма с границами области взрываемости. Показано, что при увеличении диаметра сосуда происходит сдвиг области взрываемости в сторону более низких температур и повышенных концентраций азотной кислоты.

Исследование было выполнено за счет средств государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

## Литература

1. Назин Е. Р., Зачиняев Г. М. Пожаровзрывобезопасность технологических процессов радиохимических производств. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2009.
2. Руководство по безопасности в области использования атомной энергии. Положение об оценке пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств (РБ-060-10): утв. приказом Ростехнадзора от 14.07.2010 № 406.
3. Соколов И. П., Позин А. В., Шарафутдинов Р. Б. Нормативное обеспечение взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2023. – 364 с.
4. Belova E. V., Nazin E. R., Smirnov A. V. & Belova M. M. (2024). Parameters of exothermic processes in nitric acid solutions containing reducing agents. Progress in nuclear energy, 176, 105408. DOI: 10.1016/j.pnucene.2024.105408.
5. Nazin E. R. & Belova E. V. (2022). Conditions leading to and characteristics of exothermic processes in condensed mixtures used in technological processes of hydrometallurgical reprocessing of spent nuclear fuel. Progress in nuclear energy, 149, 104254. DOI: 10.1016/j.pnucene.2022.104254.
6. Шутиков А. В., Савченко В. Е., Виграненко Ю. М., Хрусталева В. А. Пути совершенствования водно-химического режима второго контура АЭС с ВВЭР-1000 // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2008. № 312 (2), с. 39–43.
7. Соколов И. П., Емельянов А. С. Термодинамическая оценка взрывоопасности реакции этаноламина с азотной кислотой // Ядерная и радиационная безопасность. 2019. № 92 (2), с. 3–9. DOI: 10.26277/SECNRS.2019.92.2.001.
8. Emel'yanov A. S., Nazin E. R., Belova E. V. & Myasoedov B. F. (2020). Thermal Stability of Nitric-Acid Solutions Containing Monoethanolamine. Radiochemistry, No. 62 (6), pp. 730–735. DOI: 10.1134/S1066362220060041.
9. Соколов И. П., Смирнов А. В., Белова Е. В. (2024). Графический подход к определению термобарических границ области взрываемости моноэтаноламина в азотнокислых растворах // Ядерная и радиационная безопасность, № 112 (2), с. 17–27. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.112.2.002.
10. Соколов И. П., Белова Е. В., Попков В. А. Диаграммы взрываемости органических соединений в азотнокислых растворах. – М.: АО «Т8 Издательские Технологии», 2024. – 82 с. ISBN 978-5-521-24462-1.

## References

1. Nazin E. R. & Zachinyaev G. M. (2009). Pozharovzryvobezопасnost' tekhnologicheskikh protsessov radiokhimicheskikh proizvodstv [Fire and explosion safety of technological processes in radiochemical industry]. Moscow: SEC NRS [in Russian].
2. Rukovodstvo po bezопасnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii “Polozhenie ob otsenke pozharovzryvobezопасnosti tekhnologicheskikh protsessov radiokhimicheskikh proizvodstv” (RB-060-10) [Safety guide in the field of atomic energy use “Provision on assessment of fire and explosion safety of technological processes of radiochemical production” (RB-060-10)]. 2010.
3. Sokolov I. P., Ponizov A. V. & Sharafutdinov R. B. (2023). Normativnoe obespechenie vzryvobezопасnosti ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla [Regulatory support for explosion safety of nuclear fuel cycle facilities]. Moscow: SEC NRS. 364 p. [in Russian].
4. Belova E. V., Nazin E. R., Smirnov A. V. & Belova M. M. (2024). Parameters of exothermic processes in nitric acid solutions containing reducing agents. Progress in nuclear energy, 176, 105408. DOI: 10.1016/j.pnucene.2024.105408.
5. Nazin E. R. & Belova E. V. (2022). Conditions leading to and characteristics of exothermic processes in condensed mixtures used in technological processes of hydrometallurgical reprocessing of spent nuclear fuel. Progress in nuclear energy, 149, 104254. DOI: 10.1016/j.pnucene.2022.104254.
6. Shutikov A. V., Savchenko V. E., Vigranenko Yu. M. & Khrustalev V. A. (2008). Puti sovershenstvovaniya vodno-khimicheskogo rezhima vtorogo kontura AES s VVER-1000 [Ways to improve the water chemistry regime of the second circuit of NPP with VVER-1000]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georесursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, No. 312 (2), pp. 39–43. [in Russian].
7. Sokolov I. P. & Emelyanov A. S. (2019). Termodinamicheskaya otsenka vzryvoопасnosti reaktsii ehhtanolamina s azotnoi kislotoi [Thermodynamic explosion hazard estimation of reaction ethanolamine with

nitric acid]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 2 (92), pp. 3–9. DOI: 10.26277/SECNRS.2019.92.2.001. [in Russian].

8. Emel'yanov A. S., Nazin E. R., Belova E. V. & Myasoedov B. F. (2020). Thermal Stability of Nitric-Acid Solutions Containing Monoethanolamine. *Radiochemistry*, No. 62 (6), pp. 730–735. DOI: 10.1134/S1066362220060041.

9. Sokolov I. P., Smirnov A. V. & Belova E. V. (2024). Graficheskii podkhod k opredeleniyu termobaricheskikh granits oblasti vzryvaemosti monoethanolamina v azotnokislykh rastvorakh [Graphical approach to determining the thermobaric boundaries of the explosive range of monoethanolamine in nitric acid solutions]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 2 (112), pp. 17–27. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.112.2.002. [in Russian].

10. Sokolov I. P., Belova E. V., Popkov V. A. (2024). Diagrammy vzryvaemosti organicheskikh soedinenij v azotnokislykh rastvorah [Explosive diagrams of organic compounds in nitric acid solutions]. Moscow: AO "T8 Izdatel'skie Tekhnologii", 82 p. ISBN: 978-5-521-24462-1. [in Russian].

### Сведения об авторах

*Соколов Иван Павлович*, главный научный сотрудник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

*Смирнов Антон Витальевич*, научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук (119071, Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4).

*Белова Елена Вячеславовна*, заведующая лабораторией, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина Российской академии наук (119071, Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4).

### Authors credentials

*Sokolov Ivan Pavlovich*, Chief Researcher of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140), e-mail: isokolov@secnrs.ru.

*Smirnov Anton Vital'evich*, Researcher, A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of Russian Academy of Sciences (31 bld. 4, Leninsky Prospect, Moscow, 119071), e-mail: meller1@yandex.ru.

*Belova Elena Vyacheslavovna*, Head of the Laboratory, A. N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of Russian Academy of Sciences (31 bld. 4, Leninsky Prospect, Moscow, 119071), e-mail: bl174@bk.ru.

### Для цитирования

*Соколов И. П., Смирнов А. В., Белова Е. В.* Влияние скорости нагрева и диаметра реакционного сосуда на температуру начала теплового взрыва моноэтаноламина в азотнокислых растворах // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2025. № 1 (115). С. 52–61. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.115.1.004.

### For citation

*Sokolov I. P., Smirnov A. V., Belova E. V.* (2025). Vliyanie skorosti nagreva i diametra reaktzionnogo sosuda na temperaturu nachala teplovogo vzryva monoethanolamina v azotnokislykh rastvorakh [On the influence of heating rate and reaction vessel diameter on the onset temperature of the thermal explosion of monoethanolamine in nitric acid solutions]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 1 (115), pp. 52–61. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.115.1.004.