

ВЛИЯНИЕ УРАНИЛНИТРАТА НА ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРАХ ВОССТАНОВИТЕЛЕЙ

© 2025 г. А. С. Объедков, А. Н. Гришаев, Е. В. Белова*

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
119071, Москва, Ленинский пр., д. 31, корп. 4

*e-mail: bl174@bk.ru

Получена 26.11.2024, после доработки 26.12.2024, принята к публикации 27.12.2024

Исследована термическая устойчивость азотнокислых растворов ацетогидроксамовой кислоты, карбогидразида, гидразин-нитрата и их смесей. Определена температура начала экзотермической реакции, рассчитаны значения тепловых эффектов реакций. Изучено влияние уранилнитрата на термическую устойчивость восстановителей и их смесей. Сравнение характеристик экзотермических процессов в растворах с уранилнитратом и без него показало, что введение уранилнитрата снижает интенсивность экзотермических процессов для всех изученных азотнокислых растворов.

Ключевые слова: уранилнитрат, гидразин, карбогидразид, ацетогидроксамовая кислота, переработка отработавшего ядерного топлива, термолиз, взрывобезопасность

DOI: 10.31857/S0033831125010117

ВВЕДЕНИЕ

Азотнокислые растворы восстановителей применяют при переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) на стадии селективного разделения U, Pu и Np. Разделение этих элементов основано на различии в экстракционной способности отдельных валентных форм [1]. Широко распространенным восстановителем, использующимся на перерабатывающих заводах, является гидразин-нитрат (ГН) [2–4]. Добавление ГН позволяет предохранить хорошо экстрагируемый U(IV) и плохо экстрагируемый Pu(III) от окисления азотистой кислотой, что способствует разделению данных элементов [5]. Существенным недостатком ГН является образование азотистоводородной кислоты (HN_3), накапливающейся в среднеактивных отходах (САО) и являющейся чрезвычайно взрывоопасным соединением [6, 7].

В настоящее время активно исследуется возможность внедрения в технологию органических восстановителей, которые бы позволяли быстрее и более избирательно осуществлять разделение урана, плутония и нептуния [8, 9]. В число таких соединений входят гидроксамовые кислоты (ГК) и ряд замещенных гидразинов (ЗГ).

Одним из представителей класса ГК является ацетогидроксамовая кислота (АГК, CH_3CONHOH), которая обладает как восстановительными, так и комплексообразующими свойствами. С помощью АГК можно удалить Np вместе с Am, Cm и продуктами деления, поскольку она может быстро восстанавливать Np(VI) до Np(V) и образовывать комплексы с Np(IV) [8]. Однако восстановление Np(V)

до Np(IV) под действием АГК либо идет медленно, либо вообще не происходит из-за возможного гидролиза, происходящего быстрее, чем восстановление Np(V) [11].

Одним из наиболее перспективных восстановителей среди ЗГ является карбогидразид (КГ, $(\text{NH}_2\text{NH})_2\text{CO}$) [12]. Как ГН и АГК, он способен восстанавливать Pu(IV) и Np(VI). Отличительной особенностью КГ является то, что существует зависимость скорости восстановления Pu и Np от концентрации азотной кислоты: чем ниже кислотность, тем быстрее идет восстановление [13, 14]. Подобная закономерность делает КГ эффективным восстановителем при реэкстракции слабокислыми растворами.

Из-за высокой молекулярной массы и прочных водородных связей восстановители обладают высокой температурой кипения, что создает возможность концентрирования данных веществ с азотной кислотой на стадии упаривания [15]. В истории российских предприятий известны случаи аварийных ситуаций, вызванные интенсивными экзотермическими реакциями в азотнокислых растворах восстановителей [16–18] с выделением больших объемов газов, что приводило к разгерметизации оборудования, выбросу растворов и радиоактивному загрязнению. Четыре крупные аварии связаны с технологическими операциями упаривания растворов уранилнитрата (УН) на радиохимических производствах [19, 20]. Цель данной работы – изучение влияния макрокомпонента ОЯТ – урана – на термическую стабильность реакционноспособных азотнокислых растворов АГК, КГ, ГН и их смесей, которые могут разлагаться в режиме теплового взрыва.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследована термическая устойчивость следующих восстановителей: карбогидразид (КГ) 97% (Acros), концентрация 20 г/л (0.22 моль/л); ацетогидроксамовая кислота (АГК) 98% (Радиевый институт им. В.Г. Хлопина), концентрация 12 г/л (0.16 моль/л); гидразин-нитрат (ГН), концентрация 20 г/л (0.21 моль/л). ГН готовили путем смешения гидразин-гидрата (ГГ) 100% (ООО “Паритетекс”) с азотной кислотой в молярном соотношении 1 : 1 для достижения установленных концентраций ГН и кислоты. Растворы готовили смешением с 3.2 моль/л азотной кислотой марки ос.ч. Концентрацию азотной кислоты определяли методом потенциометрического титрования.

Для получения растворов смесей восстановителей 3.2 моль/л HNO_3 смешивали с рассчитанным количеством ГН, затем добавляли АГК или КГ и перемешивали до полного растворения кристаллов.

Влияние уранилнитрата (УН) изучали для всех растворов восстановителей и их смесей. Навеску УН массой 800 мг смешивали с 1 мл раствора восстановителя или смеси до полного его растворения. Концентрация по урану составила 379 г/л. Введение навески УН в растворы АГК и АГК + ГН окрашивало их в темно-коричневый цвет; растворы КГ, ГН и КГ + ГН окраску не меняли.

Параметры экзотермических реакций в азотнокислых растворах в условиях линейного нагрева определяли методом дифференциално-сканирующей калориметрии на приборе ДСК-500 (СамГТУ). Аликвоту объемом 10 мкл помещали в герметичный тигель из нержавеющей стали и нагревали со скоростью 5°C/мин в интервале 50–250°C. Образцом сравнения служил пустой тигель. Программным комплексом TSS в среде TDpro определяли температуру начала экзотермической реакции ($T_{\text{ст}}$, °C), максимальную температуру теплового потока ($T_{\text{макс}}$, °C) и удельный тепловой эффект ($Q_{\text{уд}}$, Дж/г_{p-pa}). Погрешность измерений не превышала 3 отн.%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экзотермические процессы в азотнокислом растворе ГН и его смеси с УН

Динамика изменения тепловыделения при нагреве растворов ГН с УН и без него представлена на рис. 1, а характеристики экзотермических процессов – в табл. 1.

Как видно из термограммы, экзотермические процессы в азотнокислом растворе ГН характеризуются наличием трех пиков тепловыделения, что свидетельствует о многостадийности процесса взаимодействия ГН с азотной кислотой. Основное и примерно равное количество тепла выделяется в первой и третьей реакциях.

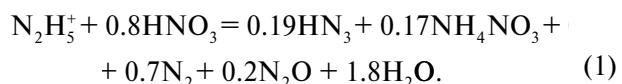
Таблица 1. Характеристики экзотермических процессов в азотнокислых смесях ГН

Смесь	$T_{\text{ст}}$, °C	$T_{\text{макс}}$, °C	Q , мДж	$Q_{\text{уд}}$, Дж/г _{p-pa}
ГН [21]	102	141/158/189*	1688	127
ГН с УН	118	144/153/184*	1861	112

* После косой черты приведены данные для второго и следующих экзотермических эффектов. Точность измерения T равна ±3%, Q – ±2%.

Введение в раствор УН не оказывает влияния на стадийность экзотермических реакций, однако незначительно меняет их характеристики. Так, присутствие УН в растворе ГН приводит к смещению максимумов теплового потока. Стартовая температура первой реакции увеличивается до 118°C, а тепловыделение достигает своего максимума быстрее, чем в растворе без УН. Процесс практически сразу переходит во вторую реакцию, интенсивность которой значительно выше по сравнению с раствором без УН. Интенсивность третьей реакции в присутствии УН снижается. Суммарное количество выделившегося тепла, как ни странно, оказалось выше на 10%, в то время как удельное тепловыделение снизилось на 12% по сравнению с раствором индивидуального восстановителя.

Из литературы известно [22], что азотнокислые растворы ГН экзотермически разлагаются до азотистоводородной кислоты (AK , HN_3) и нитрата аммония (NA , NH_4NO_3) по реакции (1):



Мы полагаем, что первая экзотермическая реакция описывает процесс разложения ГН в присутствии HNO_3 по уравнению (1). Продукты этой реакции являются реакционноспособными веществами

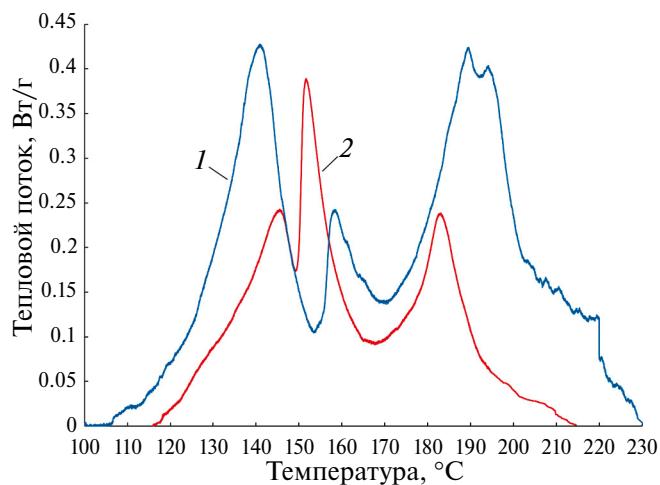


Рис. 1. Изменение теплового потока при нагреве растворов в 3.2 моль/л HNO_3 : 1 – ГН, 2 – ГН с УН.

и сами способны разлагаться с выделением тепла [23]. Азиды некоторых тяжелых металлов относятся к классу инициирующих взрывчатых веществ [24]. Нитрат аммония также способен экзотермически разлагаться. Не исключено, что последующие два экзотермических эффекта связаны с реакциями разложения АК и НА или являются результатом их взаимодействия с азотной кислотой.

Повышение интенсивности второй реакции, вероятнее всего, происходит из-за взаимодействия АК с ураном. Такое взаимодействие может либо приводить к образованию азигда урана, либо указывать на участие урана в качестве катализатора экзотермического разложения АК.

В растворах гидразин может образовывать комплекс общего состава $[UO_2(N_2H_4)_2(NO_3)_2] \cdot nH_2O$ [25]. Наличие такого комплекса и может являться причиной увеличения стартовой температуры экзотермического процесса и снижения тепловыделения за счет связывания ГН в более стойкий к HNO_3 комплекс.

Исследования методом ДСК (объем образцов 10 мкл) позволили детально выявить сложный характер экзотермических процессов в азотнокислых растворах ГН. Однако тепловыделение в условиях нагрева азотнокислых растворов ГН в автоклаве (объем образцов 30 см³) значительно выше [18], чем в ДСК, и описывается одной интенсивной экзотермической реакцией, по характеру близкой к тепловому взрыву.

Экзотермические процессы в азотнокислом растворе АГК и ее смесей

В азотнокислом растворе АГК протекает одна экзотермическая реакция при стартовой температуре 74°C, динамика ее тепловыделения представлена на рис. 2, а характеристики экзотермического процесса – в табл. 2. Присутствие УН приводит к снижению температуры начала экзотермического

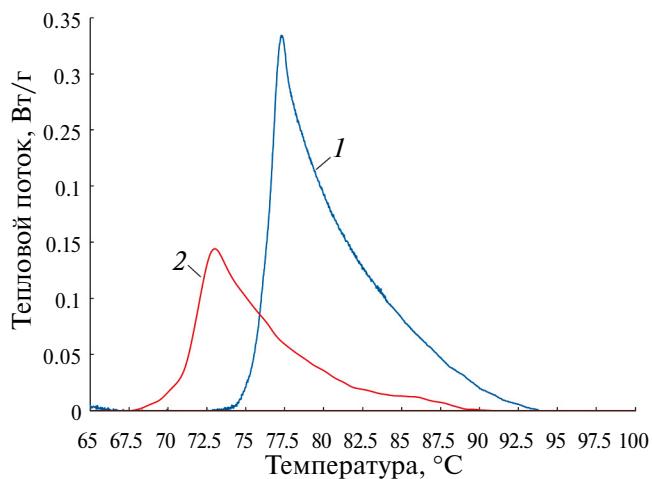


Рис. 2. Изменение теплового потока при нагреве растворов в 3.2 моль/л HNO_3 ; 1 – АГК, 2 – АГК с УН.

Таблица 2. Термические параметры азотнокислых растворов АГК и ее смесей

Смесь	$T_{ст}, ^\circ C$	$T_{макс}, ^\circ C$	$Q, мДж$	$Q_{уд}, Дж/г_{p-pa}$
АГК [21]	74	78	760	67
АГК с УН	67	73	173	11
АГК с ГН [21]	91/156*	125/180*	1835	137
АГК с ГН и УН	90/115*	94/135/174*	1225	73

* После косой черты приведены данные для второго и следующих экзотермических эффектов. Точность измерения T равна $\pm 3\%$, $Q - \pm 2\%$.

процесса, на 78% уменьшается общее тепловыделение, при этом удельное тепловыделение снижается в 4.4 раза.

При нагреве смеси АГК с ГН имеют место два процесса с тепловыделением (рис. 3) при температурах 91 и 156°C, причем основное количество тепла выделяется на первой стадии. Можно предположить, что общее количество выделившегося тепла должно составлять сумму тепловыделения от каждого из восстановителей. Однако реально выделилось на 30% меньше. Температура начала первой экзотермической реакции выше, чем для раствора с АГК, но ниже, чем для раствора с ГН. Характер тепловыделения позволяет предположить, что в первом процессе сначала реагирует ГН, затем АГК. Вторая реакция относится либо к высокотемпературным реакциям с ГН, либо к взаимодействию продуктов термолиза АГК и ГН.

При введении в раствор УН стадийность процессов тепловыделения и стартовая температура экзотермической реакции практически не меняются (табл. 2), подавляющее количество тепла выделяется в первой реакции. Общее количество

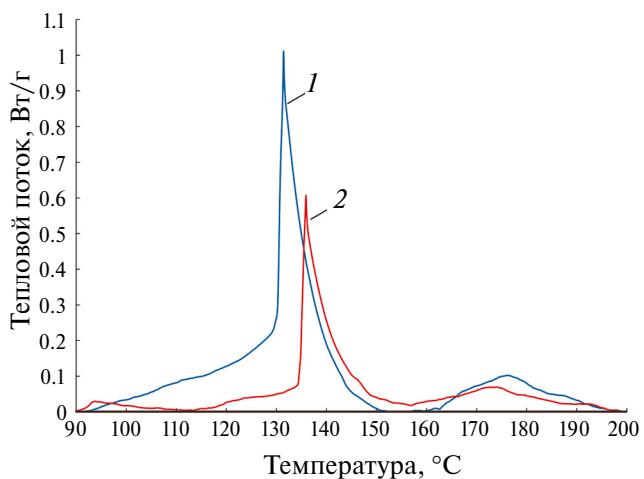


Рис. 3. Изменение теплового потока при нагреве растворов в 3.2 моль/л HNO_3 ; 1 – АГК с ГН, 2 – АГК с ГН и УН.

выделяющегося тепла составляет 66% от тепловыделения в растворе без УН.

Азотнокислые растворы с АГК в присутствии УН изначально термически неустойчивы вследствие высокой степени гидролиза АГК [24], они разлагаются с образованием гидроксиламина (ГА). Взаимодействие ГА с азотной кислотой описывается реакцией автокатализа [27]:



Реакция, зафиксированная нами в растворе АГК, имеет автокаталитический характер и хорошо описывается уравнениями (2) и (3).

Резкое снижение тепловыделения в присутствии УН позволяет предположить, что в экзотермической реакции участвует значительно меньшее количество восстановителя. Таким образом, при введении УН в азотнокислый раствор АГК происходит взаимодействие АГК с УН, что было отмечено еще при изготовлении раствора (побурение). По данным работы [28], АГК образует с УН комплекс состава $\text{UO}_2(\text{АГК})$ (NO_3^-), который устойчив в азотнокислой среде. В растворе с УН температура начала тепловыделения T_{ct} мало изменяется, но общее тепловыделение в 4.4 раза меньше. С учетом значительного увеличения плотности раствора при введении УН удельное тепловыделение может уменьшаться еще больше.

На термограмме АГК без УН разница между началом экзотермической реакции и температурой максимума теплового потока составляет 4°C , что

свидетельствует о достаточно быстрой реакции. На термограмме АГК с УН разница между началом реакции и точкой максимума составляет 6°C ; таким образом, УН несколько замедляет взаимодействие компонентов.

Экзотермические процессы в азотнокислом растворе КГ и его смесей

В азотнокислом растворе КГ при нагреве протекают две экзотермические реакции. Первая начинается при температуре 128°C и растянута во времени, максимум теплового потока приходится на 157°C . Вторая экзотермическая реакция начинается при 173°C , она разделена во времени от первой, тепловыделение существенно больше. Динамика тепловыделения в азотнокислом растворе КГ с УН и без него при нагреве представлена на рис. 4, характеристики экзотермического процесса – в табл. 3.

Таблица 3. Термические параметры азотнокислых растворов КГ и его смесей

Смесь	T_{ct} , $^\circ\text{C}$	T_{\max} , $^\circ\text{C}$	Q , мДж	$Q_{\text{уд}}$, $\text{Дж}/\text{г}_{\text{p-pa}}$
КГ	128/173*	157/193*	1973	274
КГ с УН	125	153/182*	1683	102
КГ с ГН [21]	91/120*	96/159/195*	8013	631
КГ с ГН и УН	100	104/145/189*	3119	172

* После косой черты приведены данные для второго и следующих экзотермических эффектов. Точность измерения T равна $\pm 3\%$, $Q = \pm 2\%$.

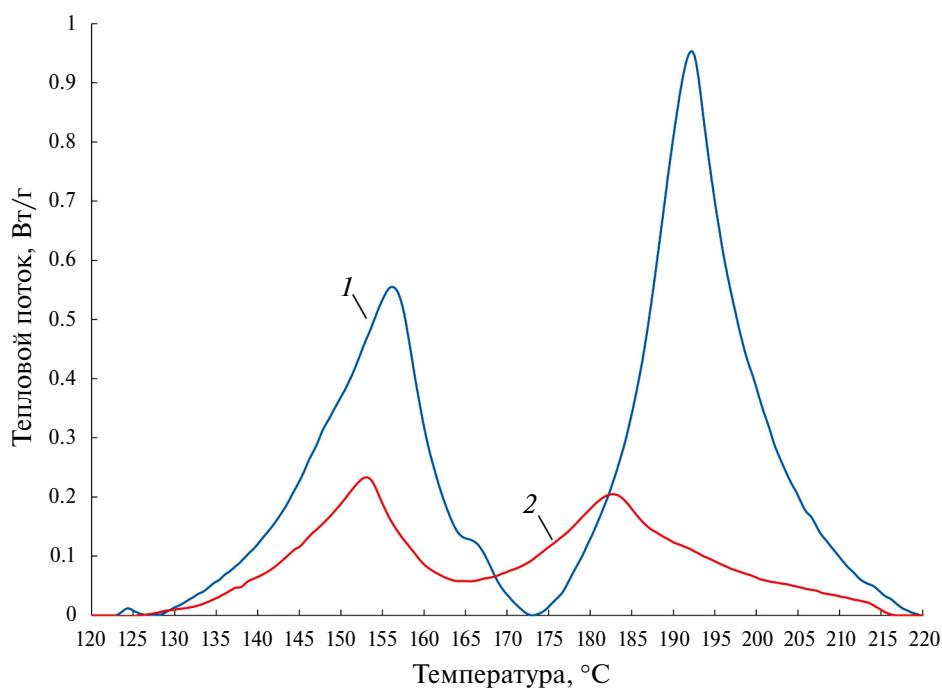


Рис. 4. Изменение теплового потока при нагреве растворов в 3.2 моль/л HNO_3 : 1 – КГ, 2 – КГ с УН.

Введение УН приводит к снижению интенсивности экзотермических процессов на 15%, при этом реакции не разделены температурным интервалом и протекают последовательно. Стартовая температура и положение первой экзотермической реакции практически не изменяются, удельная теплота экзотермической реакции из-за высокой плотности раствора снижается примерно в 2.7 раза.

Для раствора КГ с ГН в 3.2 моль/л HNO_3 зафиксировано протекание двух основных экзотермических реакций. Первая из них начинается при температуре 91°C, что ниже, чем для раствора с ГН и с КГ. Суммарное тепловыделение составляет около 85% от величины тепловыделения имеющихся в растворе восстановителей.

Динамика тепловыделения в смеси КГ и ГН с УН при нагревании представлена на рис. 5.

Добавление УН к смеси КГ с ГН приводит к увеличению стартовой температуры реакции до 100°C и значительному уменьшению суммарного тепловыделения.

Как и другие восстановители, КГ может образовывать с УН комплексное соединение состава $[\text{UO}_2((\text{N}_2\text{H}_3)_2\text{CO})_3](\text{NO}_3)_2$ [29]. Согласно результатам термического анализа, комплекс УН с КГ стабилен до 215°C, а при дальнейшем нагреве протекает интенсивный экзотермический процесс. По результатам ДСК не установлено изменений в характере протекания процесса в растворе; возможно, в азотнокислом растворе разложение комплекса происходит при более высоких температурах.

Кроме того, в результате взаимодействия КГ с азотной кислотой происходит образование нитрата и/или динитрата диаминомочевины [30], в работе [31] указывается образование карбонилазида ($\text{CO}(\text{N}_3)_2$). Все эти соединения являются взрывчатыми веществами в воздушно-сухом состоянии. Можно предположить, что в растворе образуются одно или несколько таких соединений, что приводит к протеканию многостадийных экзотермических процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Присутствие УН в азотнокислых растворах с восстановителями относительно мало влияет на стартовую температуру экзотермической реакции, но снижает суммарное тепловыделение. Величина этого снижения зависит от типа восстановителя. С АГК, активно реагирующей с УН, снижение составляет 78%, а с КГ – 15%. Не исключено, что снижение тепловыделения обусловлено связыванием восстановителей в комплексы с УН, более стойкими в азотнокислом растворе. Особенно резко снижается удельное тепловыделение вследствие значительного увеличения плотности растворов с УН. Таким образом, наличие УН “флегматизирует” азотнокислые растворы с восстановителями (рис. 1 доп.), переводит их из потенциально взрывоопасных в безопасные в отношении интенсивных экзотермических реакций.

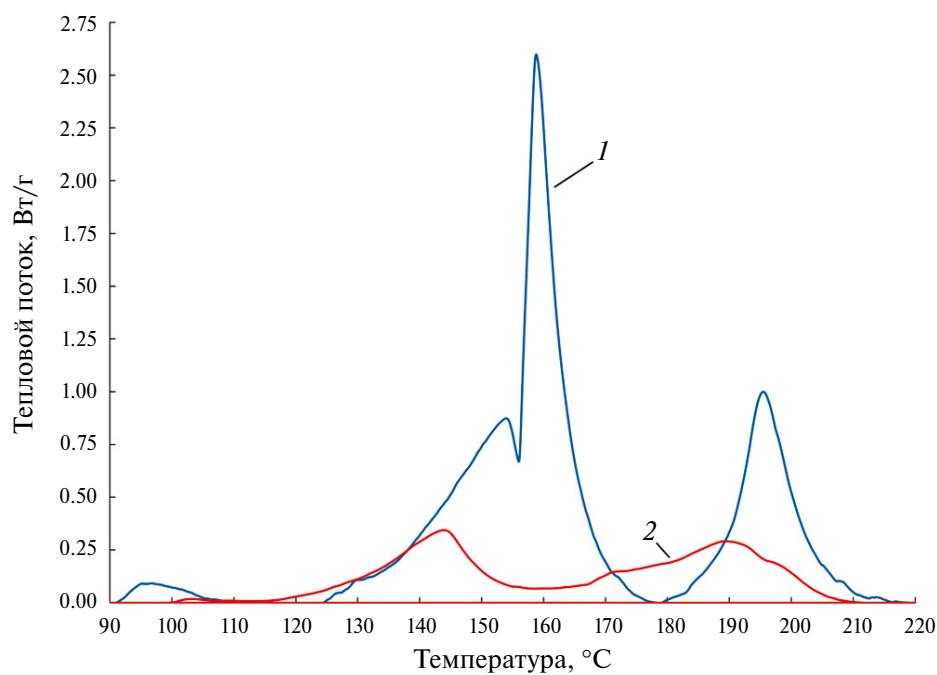


Рис. 5. Изменение теплового потока при нагреве растворов в 3.2 моль/л HNO_3 : 1 – КГ с ГН, 2 – КГ с ГН и УН.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Дополнительные материалы для этой статьи доступны по <https://doi.org/10.31857/S0033831125010117> для авторизованных пользователей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование проводили на оборудовании Центра коллективного пользования физико-химическими методами исследования ИФХЭ РАН и Уникальной научной установки “Комплекс радиационно-химических исследований” ИФХЭ РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marchenko V.I., Alekseenko V.N., Dvoeglazov K.N. // Radiochemistry. 2015. Vol. 57. N 4. P. 366.*
2. *Nazin E.R., Zachinyaev G.M., Belova E.V., Emel'yanov A.S., Myasoedov B.F. // Radiochemistry. 2019. Vol. 61. N 6. P. 671.*
3. *Melent'ev A.B., Mashkin A.N., Tugarina O.V., Koluppaev D.N., Zilberman B.Ya., Tananaev I.G. // Radiochemistry. 2011. Vol. 53. N 3. P. 256.*
4. *Марченко В.И., Двоеглазов К.Н. // Радиохимия. 2019. Т. 61. N 4. С. 320.*
5. *Волк В.И., Двоеглазов К.Н., Алексенко В.Н., Алексенко С.Н., Кривицкий Ю.Г. Патент RU 2514947 С2. 2012.*
6. *Егоров Г.Ф., Белова Е.В., Тхоржницкий Г.П., Смирнов А.В., Тананаев И.Г. // Вопр. радиац. безопасности. 2010. № 4. С. 22.*
7. *Марченко В.И., Двоеглазов К.Н. // Радиохимия. 2020. Т. 62. № 3. С. 202.*
8. *Tkac P., Precek M., Paulenova A. // Proc. Global 2009. Paris, France, Sept. 9, 2009. Paper 9122.*
9. *Alekseenko V.N., Volk V.I., Marchenko V.I., Dvoeglazov K.N., Bychkov S.I., Bondin V.V. // Radiochemistry. 2012. Vol. 54. N 2. P. 149.*
10. *Chung D.Y., Lee E.H. // J. Ind. Eng. Chem. 2006. Vol. 12. N 6. P. 962.*
11. *Chung D.Y., Lee E.H. // J. Alloys Compd. 2008. Vol. 451. N 1–2. P. 440.*
12. *Volk V.I., Marchenko V.I., Dvoeglazov K.N., Alekseenko V.N., Bychkov S.I., Pavlyukevich E.Yu. et al. // Radiochemistry. 2012. Vol. 54. N 2. P. 143.*
13. *Zhang M., Hou X., Qiao J., Yang H. // 17th Radiochemical Conf. Mariánské Lázně, Czech Republic, May 11–16, 2014. P. 97.*
14. *Zavalina O.A., Dvoeglazov K.N., Pavlyukevich E.Yu., Stepanov S.I. // Radiochemistry. 2017. Vol. 59. N 5. P. 453.*
15. *Емельянов А.С., Родин А.В., Зачиняев Г.М. // Ядерн. и радиац. безопасность. 2021. Т. 100. № 2. С. 7.*
16. *Nazin E.R., Zachinyaev G.M., Belova E.V., Emel'yanov A.S., Myasoedov B.F. // Radiochemistry. 2019. Vol. 61. N 6. P. 671.*
17. *Nazin E.R., Belova E.V. // Prog. Nucl. Energy. 2022. Vol. 149. ID 104254.*
18. *Назин Е.Р., Зачиняев Г.М. Пожаровзрывобезопасность технологических процессов радиохимических производств. М.: НТЦ ЯРБ, 2009. 195 с.*
19. *Significant Incidents in Nuclear Fuel Cycle Facilities: IAEA-TECDOC-867. Vienna: IAEA, 1996.*
20. *Usachev V.N., Markov G.S. // Radiochemistry. 2003. Vol. 45. N 1. P. 1.*
21. *Obedkov A.S., Kalistratova V.V., Skvortsov I.V., Belova E.V. // Nucl. Eng. Technol. 2022. Vol. 54. N 9. P. 3580.*
22. *Izato Y., Shiota K., Miyake A. // J. Phys. Chem. A. 2022. Vol. 126. N 19. P. 2998.*
23. *Reed E.J., Rodriguez A.W., Manaa M.R., Fried L.E., Tarver C.M. // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 109. N 3. ID 038301.*
24. *Хмельницкий Л.И. Справочник по взрывчатым веществам. М.: Военная Артиллерийская инженерная акад. им. Ф.Э. Дзержинского, 1962. Ч. II.*
25. *Kulyako Yu.M., Perevalov S.A., Trofimov T.I., Malikov D.A., Samsonov M.D., Vinokurov S.E. et al. // Radiochemistry. 2013. Vol. 55. N 6. P. 567.*
26. *Obedkov A.S., Kalistratova V.V., Smirnov A.V., Belova E.V. // Prog. Nucl. Energy. 2024. Vol. 168. ID 105044.*
27. *Gowland R., Stedman G. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1981. Vol. 43. N 11. P. 2859.*
28. *Tkac P., Paulenova A., Gable K.P. // Appl. Spectrosc. 2007. Vol. 61. N 7. P. 772.*
29. *Leshok D.Y., Alekseenko V.N., Gavrilov P.M., Alekseenko S.N., Dyachenko A.S., Samoilov A.A. et al. // Radiochim. Acta. 2015. Vol. 103. N 7. P. 477.*
30. *Fischer N., Klapötke T.M., Stierstorfer J. // Propell. Explos. Pyrotech. 2011. Vol. 36. N 3. P. 225.*
31. *Mohr E.B., Brezinski J.J., Audrieth L.F., Ritchey H.E., McFarlin R.F. // Inorg. Synth. 1953. Vol. 4. P. 32.*

The Influence of Uranyl Nitrate on Exothermic Processes in Nitric Acid Solutions of Reducing Agents

A. S. Ob"edkov, A. N. Grishaev, and E. V. Belova*

*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences,
Leninskii pr. 31, korp. 4, Moscow, 119071 Russia*

*e-mail: bl174@bk.ru

Received November 26, 2024; revised December 26, 2024; accepted December 27, 2024

The thermal stability of nitric acid solutions of acetohydroxamic acid, carbohydrazide, hydrazine nitrate, and their mixtures was studied. The onset temperature of the exothermic reaction was determined, and the thermal effects of the reactions were calculated. The influence of uranyl nitrate on the thermal stability of reducing agents and their mixtures was studied. Comparison of the characteristics of exothermic processes in solutions with and without uranyl nitrate showed that the introduction of uranyl nitrate reduced the intensity of exothermic processes in all the nitric acid solutions studied.

Keywords: uranyl nitrate, hydrazine, carbohydrazide, acetohydroxamic acid, spent nuclear fuel reprocessing, thermolysis, explosion safety